

Proyecto Fin de Carrera Ingeniería Aeroespacial

Estudio de la Aparición y Progresión del Primer Daño en laminados Cross-Ply con láminas ultradelgadas

Autor: Pablo Camacho Caño

Tutores: María Luisa Velasco López

Federico París Carballo

Dpto. Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2021



Proyecto Fin de Carrera
Ingeniería Aeroespacial

Estudio de la Aparición y Progresión del Primer Daño en laminados Cross-Ply con láminas ultradelgadas

Autor:

Pablo Camacho Caño

Tutores:

María Luisa Velasco López

Federico París Carballo

Dpto. de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2021

Proyecto Fin de Carrera: Estudio de la Aparición y Progresión del Primer Daño en laminados Cross-Ply con láminas ultradelgadas

Autor: Pablo Camacho Caño

Tutor: María Luisa Velasco López
Federico París Carballo

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2021

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis maestros

Agradecimientos

Son muchas las personas que me han ayudado y acompañado durante la elaboración de este proyecto, a todas ellas, gracias.

En primer lugar, me gustaría dar las gracias a todas las magníficas personas que me han ayudado en la realización del proyecto: a María Luisa, por su plena implicación, por haber estado disponible cuando la he necesitado y por haber aguantado mis agobios cuando las cosas se complicaban; a Federico, por sus sabias indicaciones y por su forma de transmitir y llegar a sus alumnos, por la cual decidí realizar este proyecto junto a él; a Benjamín y Pablo Dugo, por ser verdaderos compañeros durante el desarrollo del proyecto, por su completa disponibilidad cada vez que necesitaba ayuda y por transmitirme sus conocimientos de cara a la implementación del trabajo; a Antonio, por enseñarme con precisión y claridad el manejo de las máquinas; y finalmente a Rafa, por haber estado conmigo durante casi todo el proceso.

En segundo lugar, quería agradecer en general a todo el personal de los laboratorios por haber hecho posible y segura la realización de este proyecto, a pesar de las complicaciones impuestas por el Covid-19 y por haberme hecho sentir uno más del equipo.

Por último, dar las gracias a mi familia y a mi pareja, por ser mis pilares, por su apoyo y preocupación y por haberme acompañado no sólo durante todo el proyecto, sino que también durante todos mis años de carrera, en los mejores momentos y también en los más difíciles. Nada de esto habría sido posible sin vosotros.

Pablo Camacho Caño

Sevilla, 2021

Resumen

El objetivo de este trabajo es, como su propio nombre indica, el estudio de la aparición y progresión del primer daño en laminados cross-ply con láminas ultradelgadas. Para ello, se ha llevado a cabo un estudio de dos laminados con una estructura $[0_{25}, 90_6, 0_{25}]$ y $[0_{30}, 90_9, 0_{30}]$ fabricados con materiales compuestos de espesor ultradelgado.

En primer lugar, se fabricaron dichos laminados partiendo de láminas de espesor ultradelgado de los materiales USN20 y USN30 y posteriormente se cortaron los laminados, obteniendo probetas listas para ser ensayadas.

Una vez fabricados los laminados y obtenidas las probetas correspondientes, se realizaron una serie de ensayos de tracción con el fin de caracterizar dichos laminados y detectar el primer daño que aparecía en la capa de 90° . Para la detección del primer daño se cargaba progresivamente cada probeta y se inspeccionaba posteriormente en el microscopio la capa de 90° hasta encontrarlo. Una vez encontrado este primer daño, se le hacía un seguimiento para ver cómo evolucionaba al aumentar progresivamente la carga aplicada.

Por último, se realizó un estudio de los resultados obtenidos durante el trabajo realizado, llegando a una serie de conclusiones que se incluyen en la parte final de este documento.

Abstract

The objective of this project is, as its own name suggests, the study of the appearance and progression of the first damage in cross-ply laminates with ultrathin plies. For this reason, a study of two laminates with a structure $[0_{25}, 90_6, 0_{25}]$ and $[0_{30}, 90_9, 0_{30}]$ manufactured with ultra-thin composite materials has been carried out.

Firstly, these laminates were manufactured starting from plies of ultrathin thickness of the materials USN20 and USN30 and later the laminates were cut, obtaining specimens ready to be tested.

Once the laminates were manufactured and the corresponding specimens obtained, a series of tensile tests were carried out in order to characterize these laminates and detect the first damage that appeared in the 90° layer. To detect the first damage, each specimen was progressively loaded and the 90° layer was subsequently inspected under the microscope until it was found. Once this first damage was found, it was followed to see how it evolved progressively increasing the applied load.

Finally, a study of the results obtained during the process was carried out, reaching a series of conclusions that are included in the final part of this document.

Índice

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xv
Índice de Tablas	xvii
Índice de Figuras	xix
1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
1.1 <i>Introducción</i>	1
1.2 <i>Objetivos</i>	2
2 PROCESO DE FABRICACIÓN	5
2.1 <i>Fabricación de paneles</i>	5
2.1.1 Corte del material	5
2.1.2 Apilado de láminas	7
2.1.3 Bolsa de vacío	9
2.1.4 Autoclave	12
2.1.5 Obtención de los paneles	12
2.2 <i>Fabricación de tacos</i>	13
2.2.1 Lijado	14
2.2.2 Máquina de corte	15
2.3 <i>Fabricación de probetas</i>	16
2.3.1 Resanado y lijado de paneles	16
2.3.2 Unión y curado de tacos y paneles con prensa de platos calientes	17
2.3.3 Obtención de probetas	20
3 CARACTERIZACIÓN DE LOS LAMINADOS	23
3.1 <i>Caracterización del panel de 20 gsm</i>	26
3.2 <i>Caracterización del panel de 30 gsm</i>	26
4 LIJADO Y PULIDO DE LAS PROBETAS	29
5 ESTUDIO DE LA APARICIÓN Y PROGRESIÓN DEL PRIMER DAÑO	37
5.1 <i>Estudio del daño en las probetas del material de 20 gsm</i>	41
5.1.1 Probeta 20 a	41
5.1.2 Probeta 20 b	44
5.1.3 Probeta 20 c	47
5.1.4 Probeta 20 d	50
5.1.5 Probeta 20 j	54
5.2 <i>Estudio del daño en las probetas del material de 30 gsm</i>	58
5.2.1 Probeta 30 b	58
5.2.2 Probeta 30 f	63
5.2.3 Probeta 30 g	66

5.2.4	Probeta 30 h	70
5.2.5	Probeta 30 i	74
6	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	79
6.1	<i>Análisis de los ensayos de caracterización</i>	79
6.2	<i>Análisis de la aparición y progresión del daño</i>	81
6.3	<i>Análisis general de los laminados</i>	85
7	CONCLUSIONES	87
	Referencias	89

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Medidas de probetas de 20 gsm ensayadas a rotura.	24
Tabla 3.2 Medidas de probetas de 30 gsm ensayadas a rotura.	25
Tabla 3.3 Resultados obtenidos en los ensayos a rotura en probetas de 20 gsm.	26
Tabla 3.4 Cálculos de los ensayos a rotura en probetas de 20 gsm.	26
Tabla 3.5 Resultados obtenidos en los ensayos a rotura en probetas de 30 gsm.	26
Tabla 3.6 Cálculos de los ensayos a rotura en probetas de 30 gsm.	27
Tabla 5.1 Medidas de probetas de 20 gsm ensayadas a tracción.	37
Tabla 5.2 Medidas de probetas de 30 gsm ensayadas a tracción.	37
Tabla 5.3 Carga a rotura y Módulo de Young de las probetas del material de 20 gsm.	39
Tabla 5.4 Carga a rotura y Módulo de Young de las probetas del material de 30 gsm.	40
Tabla 5.5 Datos obtenidos de los ensayos de la probeta 20 a.	41
Tabla 5.6 Datos obtenidos de los ensayos de la probeta 20 b.	44
Tabla 5.7 Datos obtenidos de los ensayos de la probeta 20 c.	47
Tabla 5.8 Datos obtenidos de los ensayos de la probeta 20 d.	50
Tabla 5.9 Datos obtenidos de los ensayos de la probeta 20 j.	54
Tabla 5.10 Datos obtenidos de los ensayos de la probeta 30 b.	58
Tabla 5.11 Datos obtenidos de los ensayos de la probeta 30 f.	63
Tabla 5.12 Datos obtenidos de los ensayos de la probeta 30 g.	66
Tabla 5.13 Datos obtenidos de los ensayos de la probeta 30 h.	70
Tabla 5.14 Datos obtenidos de los ensayos de la probeta 30 i.	74
Tabla 6.1 Cálculos de los ensayos a rotura en probetas de 20 gsm.	79
Tabla 6.2 Cálculos de los ensayos a rotura en probetas de 30 gsm.	79
Tabla 6.3 Carga a rotura y Módulo de Young de las probetas del material de 20 gsm.	81
Tabla 6.4 Carga a rotura y Módulo de Young de las probetas del material de 30 gsm.	81

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Evolución del uso de materiales compuestos en la aviación (% en peso). [1]	2
Figura 1.2 Materiales utilizados en la fabricación del Airbus A350. [2]	2
Figura 2.1 Rollo de material compuesto de partida.	5
Figura 2.2 Esquema laminado [0, 90, 0].	6
Figura 2.3 Método de corte empleado. A la izquierda láminas a 0° y a la derecha a 90°.	7
Figura 2.4 Láminas de material compuesto cortadas y ordenadas.	7
Figura 2.5 Apilado de láminas.	8
Figura 2.6 Bolsa de pre-vacío.	8
Figura 2.7 Plancha metálica.	9
Figura 2.8 Materiales utilizados para la bolsa de vacío.	10
Figura 2.9 Colocación de laminados sobre la primera capa de teflón, ya delimitados por la cinta de cromato.	10
Figura 2.10 Colocación de la capa de Airweave y las tomas de vacío.	11
Figura 2.11 Bolsa de vacío terminada y lista para introducirla en la máquina de autoclave.	11
Figura 2.12 Máquina de autoclave.	12
Figura 2.13 Plancha metálica con los laminados curados justo a la salida del autoclave.	13
Figura 2.14 Material dañado tras retirar la bolsa de vacío.	13
Figura 2.15 Panel de partida de fibra de vidrio.	14
Figura 2.16 Máquina de lijado mediante una pistola de arena.	14
Figura 2.17 Máquina de corte.	15
Figura 2.18 Tacos cortados y lijados y laminados lijados.	15
Figura 2.19 Resanado de los laminados en la máquina de corte.	16
Figura 2.20 Colocación del adhesivo en los tacos.	17
Figura 2.21 Colocación de los tacos sobre los laminados con el adhesivo, antes del prensado.	18
Figura 2.22 Prensa Hidráulica.	18
Figura 2.23 Puente de Wheatstone.	18
Figura 2.24 Tabla de calibración basada en extensometría.	19
Figura 2.25 Unión final entre los tacos y los laminados.	20
Figura 2.26 Probetas obtenidas de los laminados fabricados.	21
Figura 3.1 Máquina Universal de Ensayos Instron 4483.	23
Figura 3.2 Probeta con extensómetro colocada en la máquina de ensayo.	24
Figura 4.1 Máquina utilizada para el lijado y pulido.	29
Figura 4.2 Soporte rojo sobre el que se colocan las lijas.	30

Figura 4.3 Lijas utilizadas.	31
Figura 4.4 Paños utilizados.	32
Figura 4.5 Observaciones al microscopio con distintos aumentos tras la lija de 320 μm .	32
Figura 4.6 Observaciones al microscopio con distintos aumentos tras la lija de 500 μm .	32
Figura 4.7 Observaciones al microscopio con distintos aumentos tras la lija de 800 μm .	33
Figura 4.8 Observaciones al microscopio con distintos aumentos tras la lija de 1200 μm .	33
Figura 4.9 Observaciones al microscopio con distintos aumentos tras el paño MD-Largo.	33
Figura 4.10 Observaciones al microscopio con distintos aumentos tras el paño MD-Dac.	34
Figura 4.11 Observaciones al microscopio con distintos aumentos tras el paño MD-Nap.	34
Figura 4.12 Observaciones al microscopio de las fibras en la capa de 90.	34
Figura 4.13 Observaciones al microscopio de grietas en los extremos de la capa de 90.	35
Figura 4.14 Observaciones al microscopio de grietas horizontales en el centro de la capa de 90.	35
Figura 4.15 Observaciones al microscopio de grietas verticales en el centro de la capa de 90.	35
Figura 4.16 Gran hueco en la probeta 30 c.	36
Figura 4.17 Gran hueco en la probeta 30 d.	36
Figura 4.18 Aparición de una fibra circular en la probeta 20 c.	36
Figura 5.1 Gráfico de la carga frente al alargamiento del extensómetro en probetas de 20 gsm.	39
Figura 5.2 Gráfico de la Carga frente al Alargamiento del extensómetro en probetas de 30 gsm.	40
Figura 5.3 Gráfico Carga - Alargamiento junto con la evolución de la primera grieta en la probeta 20 a.	42
Figura 5.4 Primer fallo a 17000 N (izquierda) con los despegues en rojo (derecha) en la probeta 20 a.	43
Figura 5.5 Estado de la grieta a 18500 N (izquierda) y 20000 N (derecha) en la probeta 20 a.	43
Figura 5.6 Estado de la grieta a 22500 N (izquierda) y 25000 N (derecha) en la probeta 20 a.	43
Figura 5.7 Estado de la grieta a 30000 N (izquierda) y 35000 N (derecha) en la probeta 20 a.	43
Figura 5.8 Estado de la grieta a 40000 N (izquierda) y 45000 N (derecha) en la probeta 20 a.	44
Figura 5.9 Estado de la grieta a 50000 N en la probeta 20 a a distintos aumentos (x500 izq. y x100 der).	44
Figura 5.10 Gráfico Carga - Alargamiento junto con la evolución de la primera grieta en la probeta 20 b.	46
Figura 5.11 Primer fallo a 25000 N (izquierda) con los despegues en rojo (derecha) en la probeta 20 b.	46
Figura 5.12 Estado de la grieta a 30000 N (izquierda) y 35000 N (derecha) en la probeta 20 b.	46
Figura 5.13 Estado de la grieta a 40000 N (izquierda) y 45000 N (derecha) en la probeta 20 b.	47
Figura 5.14 Estado de la grieta a 50000 N en la probeta 20 b a distintos aumentos (x500 izq. y x100 der).	47
Figura 5.15 Gráfico Carga - Alargamiento junto con la evolución de la primera grieta en la probeta 20 c.	48
Figura 5.16 Primer fallo a 20000 N (izquierda) con los despegues en rojo (derecha) en la probeta 20 c.	49
Figura 5.17 Estado de la grieta a 22500 N (izquierda) y 25000 N (derecha) en la probeta 20 c.	49
Figura 5.18 Estado de la grieta a 27500 N (izquierda) y 30000 N (derecha) en la probeta 20 c.	49
Figura 5.19 Estado de la grieta a 35000 N (izquierda) y 40000 N (derecha) en la probeta 20 c.	50
Figura 5.20 Estado de la grieta a 45000 N en la probeta 20 c a distintos aumentos (x500 izq. y x100 der).	50
Figura 5.21 Gráfico Carga - Alargamiento junto con la evolución de la primera grieta en la probeta 20 d.	52
Figura 5.22 Primer fallo a 25000 N (izquierda) con los despegues en rojo (derecha) en la probeta 20 d.	52

Figura 5.23 Estado de la grieta a 27500 N (izquierda) y 30000 N (derecha) en la probeta 20 d.	53
Figura 5.24 Estado de la grieta a 35000 N (izquierda) y 40000 N (derecha) en la probeta 20 d.	53
Figura 5.25 Estado de la grieta a 45000 N (izquierda) y 50000 N (derecha) en la probeta 20 d.	53
Figura 5.26 Estado de la grieta a 55000 N en la probeta 20 d a distintos aumentos (x500 izq. y x100 der).	54
Figura 5.27 Gráfico Carga - Alargamiento junto con la evolución de la primera grieta en la probeta 20 j.	55
Figura 5.28 Primer fallo a 12000 N (izquierda) con los despegues en rojo (derecha) en la probeta 20 j.	56
Figura 5.29 Estado de la grieta a 15000 N (izquierda) y 20000 N (derecha) en la probeta 20 j.	56
Figura 5.30 Estado de la grieta a 25000 N (izquierda) y 30000 N (derecha) en la probeta 20 j.	57
Figura 5.31 Estado de la grieta a 35000 N (izquierda) y 40000 N (derecha) en la probeta 20 j.	57
Figura 5.32 Estado de la grieta a 45000 N (izquierda) y 50000 N (derecha) en la probeta 20 j.	57
Figura 5.33 Estado de la grieta a 50000 N en la probeta 20 d a distintos aumentos (x500 izq. y x100 der).	58
Figura 5.34 Gráfico Carga - Alargamiento junto con la evolución de la primera grieta en la probeta 30 b.	59
Figura 5.35 Primer fallo a 15000 N (izquierda) con los despegues en rojo (derecha) en la probeta 30 b.	60
Figura 5.36 Estado de la grieta a 20000 N (izquierda) y 25000 N (derecha) en la probeta 30 b.	60
Figura 5.37 Estado de la grieta a 30000 N (izquierda) y 35000 N (derecha) en la probeta 30 b.	60
Figura 5.38 Estado de la grieta a 40000 N (izquierda) y 45000 N (derecha) en la probeta 30 b.	61
Figura 5.39 Estado de la grieta a 50000 N (izquierda) y 55000 N (derecha) en la probeta 30 b.	61
Figura 5.40 Estado de la grieta a 60000 N en la probeta 30 b a distintos aumentos (x500 izq. y x100 der).	61
Figura 5.41 Estado de grieta transversal 1 sin cargar (izquierda) y tras 60000 N (derecha) en la probeta 30 b.	62
Figura 5.42 Estado de grieta transversal 2 sin cargar (izquierda) y tras 60000 N (derecha) en la probeta 30 b.	62
Figura 5.43 Estado de grieta transversal 3 sin cargar (izquierda) y tras 60000 N (derecha) en la probeta 30 b.	62
Figura 5.44 Estado de grieta horizontal sin cargar (izquierda) y tras 60000 N (derecha) en la probeta 30 b.	63
Figura 5.45 Gráfico Carga - Alargamiento junto con la evolución de la primera grieta en la probeta 30 f.	64
Figura 5.46 Primer fallo a 40000 N (izquierda) con los despegues en rojo y la grieta inicial en azul(derecha) en la probeta 30 f.	65
Figura 5.47 Estado de la grieta a 45000 N (izquierda) y 50000 N (derecha) en la probeta 30 f.	65
Figura 5.48 Estado de la grieta a 55000 N (izquierda) y 60000 N (derecha) en la probeta 30 f.	65
Figura 5.49 Estado de la grieta a 60000 N en la probeta 30 f a distintos aumentos (x500 izq. y x100 der).	66
Figura 5.50 Gráfico Carga - Alargamiento junto con la evolución de la primera grieta en la probeta 30 g.	67
Figura 5.51 Primer fallo a 15000 N (izquierda) con los despegues en rojo (derecha) en la probeta 30 g.	68
Figura 5.52 Estado de la grieta a 20000 N (izquierda) y 25000 N (derecha) en la probeta 30 g.	68
Figura 5.53 Estado de la grieta a 30000 N (izquierda) y 35000 N (derecha) en la probeta 30 g.	68
Figura 5.54 Estado de la grieta a 40000 N (izquierda) y 45000 N (derecha) en la probeta 30 g.	69
Figura 5.55 Estado de la grieta a 50000 N (izquierda) y 55000 N (derecha) en la probeta 30 g.	69
Figura 5.56 Estado de la grieta a 60000 N en la probeta 30 g a distintos aumentos (x500 izq. y x100 der).	69

Figura 5.57 Gráfico Carga - Alargamiento junto con la evolución de la primera grieta en la probeta 30 h.	71
Figura 5.58 Primer fallo a 15000 N (izquierda) con los despegues en rojo (derecha) en la probeta 30 h.	72
Figura 5.59 Estado de la grieta a 20000 N (izquierda) y 25000 N (derecha) en la probeta 30 h.	72
Figura 5.60 Estado de la grieta a 30000 N (izquierda) y 35000 N (derecha) en la probeta 30 h.	72
Figura 5.61 Estado de la grieta a 40000 N (izquierda) y 45000 N (derecha) en la probeta 30 h.	73
Figura 5.62 Estado de la grieta a 50000 N (izquierda) y 55000 N (derecha) en la probeta 30 h.	73
Figura 5.63 Estado de la grieta a 60000 N en la probeta 30 h a distintos aumentos (x500 izq. y x100 der).	73
Figura 5.64 Gráfico Carga - Alargamiento junto con la evolución de la primera grieta en la probeta 30 i.	75
Figura 5.64 Primer fallo a 15000 N (izquierda) con los despegues en rojo (derecha) en la probeta 30 i.	75
Figura 5.65 Estado de la grieta a 20000 N (izquierda) y 25000 N (derecha) en la probeta 30 i.	76
Figura 5.66 Estado de la grieta a 30000 N (izquierda) y 35000 N (derecha) en la probeta 30 i.	76
Figura 5.67 Estado de la grieta a 40000 N (izquierda) y 45000 N (derecha) en la probeta 30 i.	76
Figura 5.68 Estado de la grieta a 50000 N (izquierda) y 55000 N (derecha) en la probeta 30 i.	77
Figura 5.69 Estado de grieta horizontal sin cargar (izquierda) y tras 55000 N (derecha) en la probeta 30 i.	77
Figura 5.70 Estado de grieta vertical sin cargar (izquierda) y tras 55000 N (derecha) en la probeta 30 i.	77
Figura 6.1 Rotura de las probetas de ambos paneles tras los ensayos de caracterización.	81
Figura 6.2 Primeros daños detectados en probetas de 20 gsm (izquierda) y de 30 gsm (derecha).	82
Figura 6.3 Grietas finales en probetas de 20 gsm.	83
Figura 6.4 Grietas finales en probetas de 30 gsm.	83
Figura 6.5 Detección y progresión del daño en las probetas de 20 gsm.	84
Figura 6.6 Detección y progresión del daño en las probetas de 30 gsm.	84
Figura 6.7 Observaciones al microscopio de las fibras en la capa de 90.	85
Figura 6.8 Grietas transversales en probetas de 20 gsm (izquierda) y de 30 gsm (derecha).	85
Figura 6.9 Grietas longitudinales en probetas de 20 gsm (izquierda) y de 30 gsm (derecha).	86
Figura 6.10 Probetas de 20 gsm y 30 gsm rotas tras ser ensayadas.	86

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

En los últimos años ha despertado un gran interés la utilización de los materiales compuestos y, en particular, el uso de láminas ultradelgadas, que son láminas que pueden alcanzar hasta un espesor de 20 micras y presentan grandes ventajas frente a las convencionales. El principal motivo del uso de este material son las propiedades que estos materiales ofrecen. Es necesario aclarar que el material compuesto está formado por unas fibras embebidas en una matriz de resina epoxy, siendo las fibras las que otorgan buenas propiedades al material, como la resistencia y la rigidez. Las principales características de los materiales compuestos son:

- Presentan una alta resistencia en relación con su peso.
- Baja densidad.
- Alta resistencia dieléctrica, son buenos aislantes eléctricos.
- Gran capacidad de consolidación de partes, pues permiten el ensamblaje de componentes, reduciendo así el número de elementos y por lo tanto, necesitando menor número de uniones.
- Resistencia a la corrosión. Se pueden seleccionar matrices con resistencia a cualquier medio corrosivo.
- Buen comportamiento a fatiga.
- Reducción de costes de mantenimiento. Al tener una buena resistencia a la fatiga y presentar muy buena resistencia a la corrosión se reducen las tareas de mantenimiento y costes de reparación

Teniendo en cuenta todas estas propiedades, resulta fácil comprender por qué su implementación en sectores como la industria aeronáutica y aeroespacial está en auge, ya que son sectores en los que se precisan materiales que cumplan con unos requisitos muy restrictivos, especialmente en su relación densidad-resistencia. Con el empleo de materiales compuestos se consiguen unas buenas propiedades estructurales, reduciendo notablemente el peso del avión, lo que se traduce en sistemas de propulsión menos potentes y una notable reducción del consumo de combustible.

Respecto al uso de láminas ultradelgadas, es importante destacar que la tecnología Thin Ply está revolucionando el mundo de los compuestos laminados con propiedades mecánicas significativamente mejoradas. Las láminas ultradelgadas ofrecen mejoras significativas en las propiedades mecánicas de los laminados fabricados con materiales compuestos frente a las láminas de espesor convencional, permitiendo una mayor optimización del módulo de Young aparente, la resistencia, el peso y una mejora general en el rendimiento mecánico de la pieza final, logrando un laminado más homogéneo y resistente. Finalmente, todo esto se ve traducido en un retraso en la aparición del daño en los laminados fabricados con dichas láminas ultradelgadas.

En la Figura 1.1 se plasma la evolución del uso de materiales compuestos en la fabricación de vehículos aéreos en los últimos años, llegando a alcanzar más del 50% del peso en aviones como el Airbus A350 y el Boeing B787 y cerca del 90% en el helicóptero NH90 de NHIndustries.

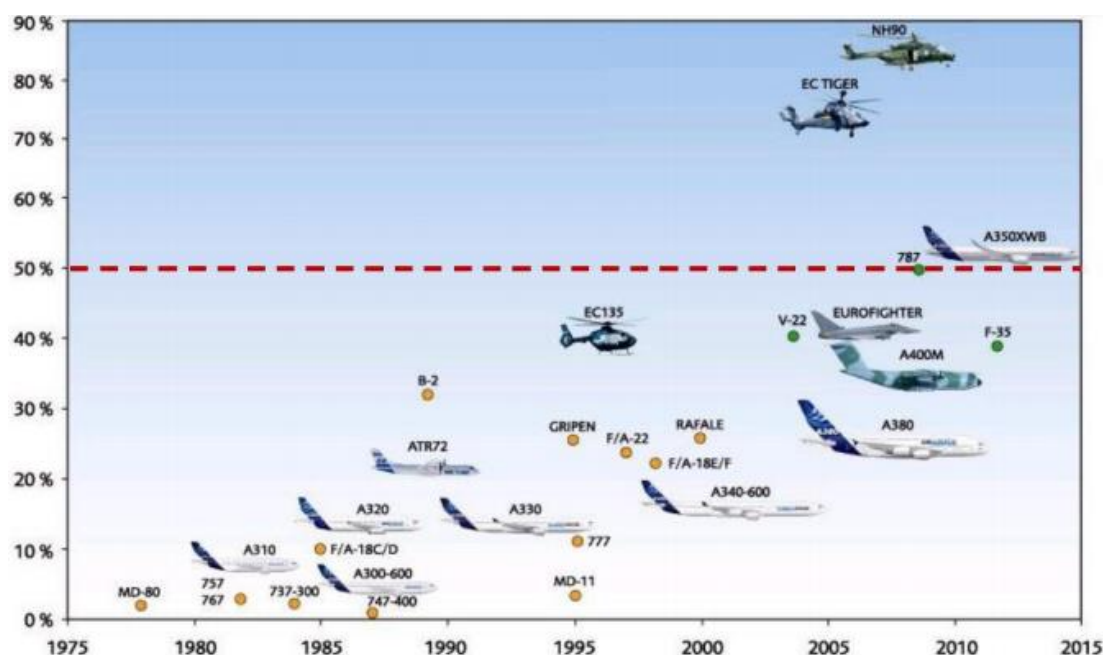


Figura 1.1 Evolución del uso de materiales compuestos en la aviación (% en peso). [1]

En la Figura 1.2 se muestra el porcentaje, respecto al peso total del avión, de cada material usado en la fabricación del antes mencionado Airbus A350. Lo más destacable es ese 52% de peso del avión que ocupan los materiales compuestos.

Airbus A350

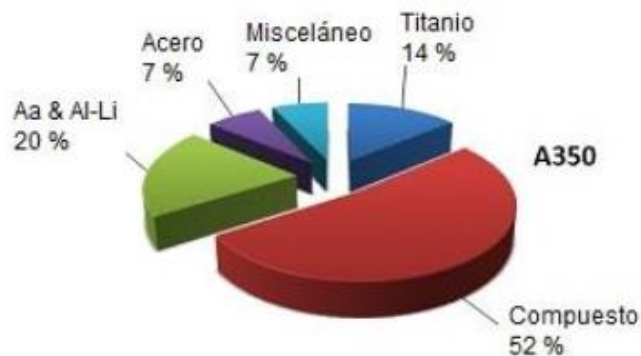


Figura 1.2 Materiales utilizados en la fabricación del Airbus A350. [2]

El presente trabajo se centra en la fabricación de laminados de materiales compuestos con láminas ultradelgadas para el posterior estudio de la aparición y progresión del daño en los mismos. Los laminados a fabricar van a tener una estructura cross-ply $[0_p, 90_h, 0_p]$, siendo p y h el número de láminas en las capas de 0° y 90° . Lo más característico de estos laminados son los materiales empleados para su fabricación: los materiales compuestos de espesor ultradelgado USN20 y USN30.

1.2 Objetivos

Este trabajo se engloba dentro de una de las líneas de investigación en materiales compuestos seguidas del Grupo de Elasticidad y Resistencia de Materiales, [3],[4],[5],[6].

Los objetivos de este proyecto son caracterizar los laminados fabricados y analizar la aparición y progresión del daño en la capa de 90° . Como ya se ha mencionado anteriormente, los laminados a fabricar van a tener una secuencia de apilado del tipo cross-ply $[0_p, 90_h, 0_p]$ y los materiales utilizados van a ser materiales compuestos de espesor ultradelgado USN20 y USN30, suministrados por Triple H Composites.

En el laminado fabricado con USN20, los parámetros p y h tomarán respectivamente los valores de 30 y 9, y en el caso del laminado fabricado con el USN30, los valores serán 25 y 6, respectivamente. Se trata de laminados que tienen aproximadamente el mismo espesor de la capa de 90° grados, con el fin de analizar si el daño se genera de forma similar en ambos, independientemente del material empleado.

Para ello, una vez fabricados los laminados y obtenidas las probetas correspondientes, se realizarán una serie de ensayos mecánicos con el fin de caracterizarlos y posteriormente se llevarán a cabo otros ensayos de tracción en los que se irá cargando progresivamente cada probeta con la intención de detectar el primer fallo que aparece en la capa de 90° y hacerle un seguimiento para ver cómo evoluciona el daño encontrado al aumentar progresivamente la carga aplicada.

2 PROCESO DE FABRICACIÓN

En este apartado se va a explicar detalladamente todo el proceso de fabricación llevado a cabo para la obtención de probetas del material compuesto, con la composición y estructura deseada. Los pasos seguidos se exponen en los apartados siguientes:

2.1 Fabricación de paneles

La fabricación de los paneles de material compuesto es la primera fase y la más delicada, especialmente debido al espesor tan fino que tenían las láminas de material compuesto ultradelgado con el que se ha trabajado. El proceso se ha llevado a cabo en la sala limpia de los laboratorios de la ETSI. La sala limpia es una sala en la que se controla que la temperatura, humedad y presión sean las idóneas para trabajar con el material compuesto sin que éste sufra contaminación ni deterioro.

A continuación, se muestra paso a paso el proceso de fabricación de los paneles de material compuesto.

2.1.1 Corte del material

El primer paso consiste en cortar láminas de material compuesto con el tamaño y orientación deseados. El material de partida es el rollo de material compuesto mostrado en la Figura 2.1, que se mantiene en una cámara frigorífica en las condiciones adecuadas.



Figura 2.1 Rollo de material compuesto de partida.

Los materiales utilizados para facilitar el trabajo del corte del material son los siguientes:

- Regla: Se utiliza para realizar los cortes lo más preciso posible con las medidas necesarias. También se utiliza de apoyo y como guía de corte.

- Rotulador: Usado para marcar referencias y así facilitar el corte.
- Escuadra y cartabón: Utilizados también para aumentar la precisión del corte y las medidas.
- Cúter: Herramienta de corte. La cuchilla se iba desechando a medida que se gastaba.

Se procede a continuación a organizar y optimizar el proceso de corte de las láminas de cinta, partiendo de sus respectivos rollos de material. Para ello, es necesario conocer cuál es la estructura deseada para nuestros laminados. Los laminados $[0, 90, 0]$ se fabrican a partir del apilamiento de láminas de cinta en dos direcciones ortogonales, tal y como se muestra en la Figura 2.2, consiguiendo así un comportamiento ortótropo.

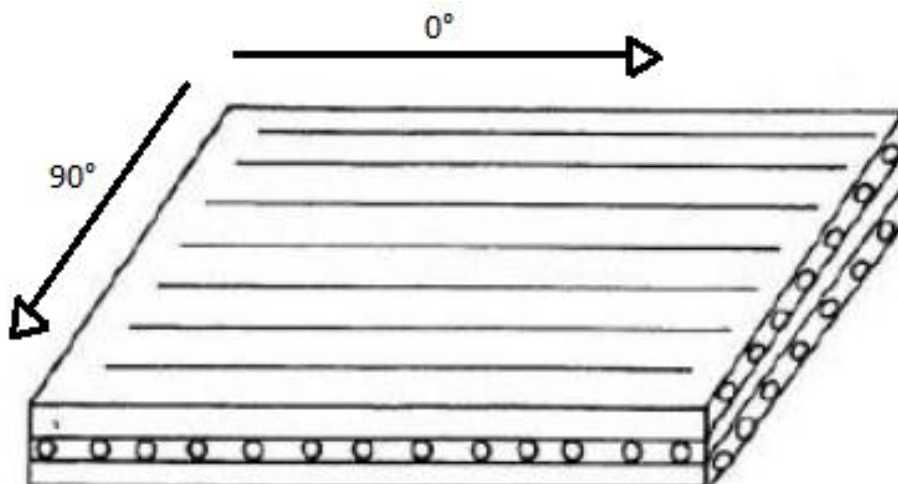


Figura 2.2 Esquema laminado $[0, 90, 0]$.

Es importante comprender que el material compuesto de fibra larga y continua, presenta mayores capacidades cuando la carga se aplica de forma longitudinal, pero no lo hace cuando ésta se encuentra aplicada transversalmente, por ello se apilan las láminas perpendicularmente otorgando resistencia en ambas direcciones. Los materiales de partida son dos rollos de material, uno de 20 gsm y otro de 30 gsm, por lo que a partir de ahora, y a modo de simplificación, a los laminados y probetas fabricados con dichos materiales se les va a denominar laminados de 20 o 30 gsm y probetas de 20 o 30 gsm. Las estructuras de sus respectivos laminados son las siguientes:

$$\begin{cases} 20 \text{ gsm} & \rightarrow [0_{30}, 90_9, 0_{30}] \\ 30 \text{ gsm} & \rightarrow [0_{25}, 90_6, 0_{25}] \end{cases}$$

De esta forma, obtenemos el número de láminas que hay que cortar de los rollos: 60 láminas orientando la fibra a 0° y 9 a 90° del material de 20 gsm y 50 láminas orientadas 0° y 6 a 90° del material de 30 gsm. Además, sabemos que las medidas de ambos laminados han de ser 300 mm de ancho y 200 mm de largo, por lo que habrá que organizar el corte teniendo en cuenta que el ancho del rollo es de 1 metro.

En la Figura 2.3 se observa el método de corte empleado para la obtención de las láminas necesarias de cada orientación de fibra. En ambos materiales se ha empleado el mismo método puesto que ambos rollos medían 1 metro y los laminados a fabricar tienen las mismas dimensiones. A la izquierda de la Figura 2.3 se observa el corte realizado para la obtención de las láminas a 0° y a la derecha el de las láminas a 90° . En el corte de las láminas a 0° , debido a las dimensiones necesarias y a la orientación de la fibra, fue inevitable desperdiciar una tira de 100 mm de ancho.

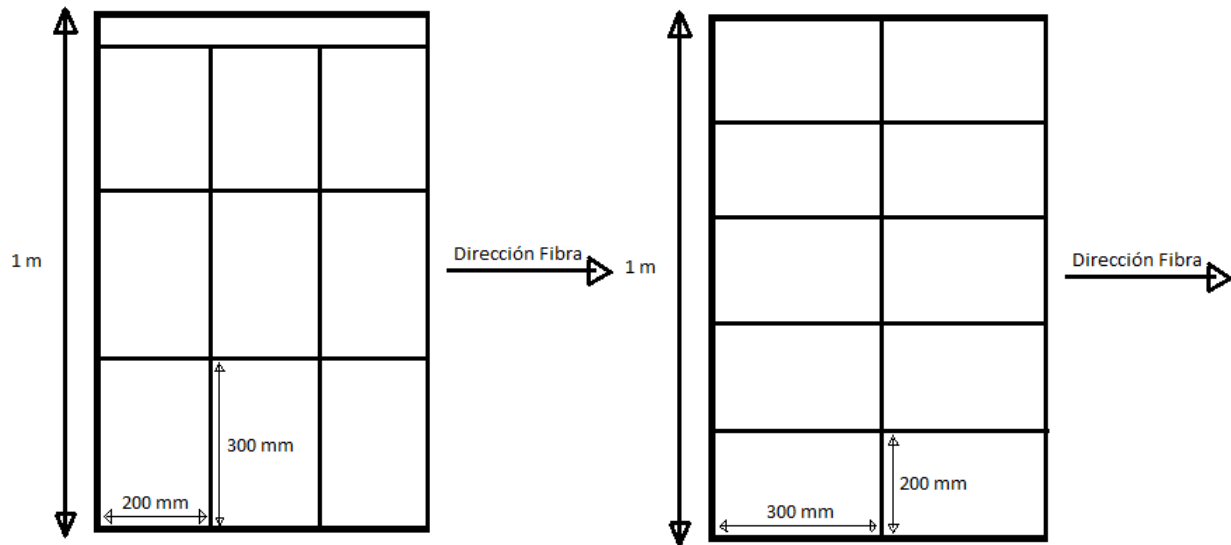


Figura 2.3 Método de corte empleado. A la izquierda láminas a 0° y a la derecha a 90° .

En total se han cortado 5 metros del rollo de material de 20 gsm y 4,2 metros del material de 30 gsm, obteniendo así 60 láminas a 0° y 9 a 90° para el primero y 70 láminas a 0° y 12 a 90° para el segundo. Como se puede observar, se cortaron algunas láminas de más de cada material para asegurarnos de tener de sobra en caso de que hubiera algún fallo durante el apilado.

Una vez realizados los cortes, se organizan las láminas de material compuesto tal y como se muestra en la Figura 2.4, en la que se han separado por material (de 20gsm o de 30 gsm), por orientación de la fibra (a 0° o a 90°) y por cantidad de láminas.



Figura 2.4 Láminas de material compuesto cortadas y ordenadas.

2.1.2 Apilado de láminas

Una vez cortadas y organizadas todas las láminas, comienza el proceso más delicado y que requiere mayor precisión: el apilado de láminas por presión. Este proceso consiste en retirar con delicadeza los plásticos

protectores de las caras de dos láminas de material, apilarlas de forma que estén centradas la una con la otra y aplicar presión manualmente con una espátula de Nylon® en el sentido de la fibra hasta que queden lo mejor pegadas posible entre ellas e intentando no dejar burbujas ni imperfecciones. En la Figura 2.5 se observa a la derecha un apilado de láminas, ya sin el plástico protector, y otra lámina a la izquierda, a la que habría que quitarle el plástico con ayuda del cúter y posteriormente apilarla y aplicar presión con la espátula de Nylon®. Hay que resaltar que el pegado entre láminas es posible gracias a la resina de la propia lámina de material compuesto.

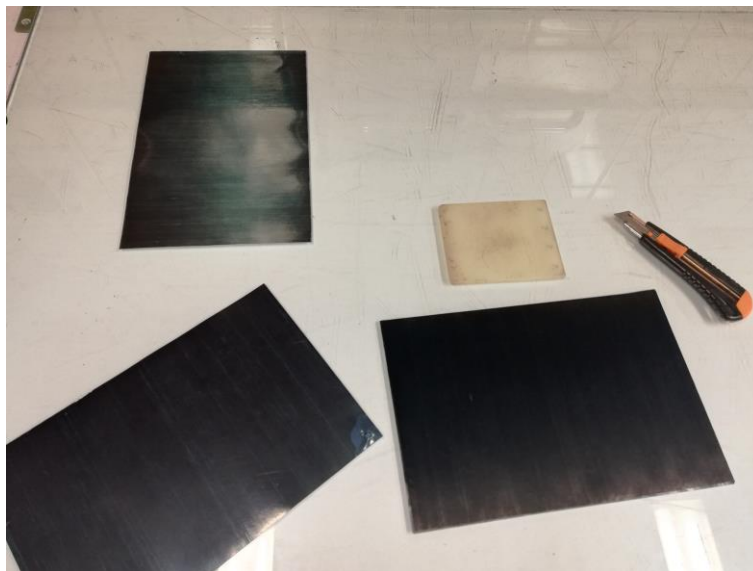


Figura 2.5 Apilado de láminas.

A modo de prevención, puesto que las láminas son extremadamente finas y frágiles, el apilado de láminas se ha realizado de 5 en 5, de forma que si en algún momento se produjera algún daño sólo se perderían como mucho 5 láminas y se continuaría trabajando con las de reserva. A su vez, estos laminados se iban introduciendo en una bolsa de pre-vacío o compactación para aplicar presión mientras se fabricaban otros laminados y así mejorar la unión y reducir las posibles imperfecciones. Esta bolsa de pre-vacío se observa en la Figura 2.6.



Figura 2.6 Bolsa de pre-vacío.

Por otro lado, a la hora de realizar el apilado de las láminas también hay que tener en cuenta la orientación de la fibra deseada en cada capa. Como ya se ha mencionado anteriormente, la secuencia deseada en nuestro caso era $[0_{30}, 90_9, 0_{30}]$ para el caso de 20 gsm y $[0_{25}, 90_6, 0_{25}]$ para el caso de 30 gsm. Por tanto, uniendo los laminados de 5 capas a 0° hasta formar 30 y 25 respectivamente y poniendo en la mitad el número de capas que le corresponde a cada material orientadas a 90° se obtienen finalmente los laminados deseados.

2.1.3 Bolsa de vacío

Una vez terminado el proceso de apilado de láminas, habrá que tratar térmicamente los laminados en el autoclave para curar la resina del material y conseguir un material compacto y sin imperfecciones ni burbujas de aire (o al menos con las menos posibles). Para poder introducir el material en la máquina de autoclave primero hay que preparar una bolsa de vacío a modo de protección. Para realizar esta bolsa de vacío, se va a hacer uso de los siguientes materiales:

- Una plancha de aluminio, como la mostrada en la Figura 2.7, sobre la que se montará la bolsa de vacío.
- Cinta de cromato, con la que se delimitará la zona de la bolsa de vacío.
- Teflón, que recubrirá los laminados por encima y por debajo.
- Airwave® (tejido aireador), colocado de forma que cubra ambos laminados.
- Tomas de vacío.
- Bolsa final que se une con las cintas de cromato en los extremos para cerrar el conjunto.
- Cúter, reglas, rotulador y otras herramientas para facilitar el corte de los materiales.

En la Figura 2.8 se pueden observar los rollos de los materiales que componen la bolsa de vacío.



Figura 2.7 Plancha metálica.



Figura 2.8 Materiales utilizados para la bolsa de vacío.

Para la correcta elaboración de la bolsa de vacío se siguen una serie de pasos:

1. Selección del tamaño adecuado de la plancha metálica, teniendo en cuenta que tienen que caber los laminados y que hay que dejar un margen para la preparación de la bolsa de vacío.
2. Pegado de la cinta de cromato delimitando la zona que ocupará la bolsa de vacío, dejando espacio suficiente para colocar los laminados y las tomas de vacío.
3. Colocación de una capa de teflón sobre la plancha, previamente cortada de su rollo correspondiente y con unas dimensiones adecuadas para colocar ambos laminados con un margen por ambos lados, tal y como se puede observar en la Figura 2.9. A continuación se colocan encima los laminados y se pone otra capa de teflón aproximadamente de las mismas dimensiones.



4.

Figura 2.9 Colocación de laminados sobre la primera capa de teflón, ya delimitados por la cinta de cromato.

5. Recubrimiento con una capa de Airweave® de forma que queden todos los laminados cubiertos y también una zona para la colocación de las tomas de vacío. Para una mayor calidad, estas tomas se

colocarán sobre una doble capa de Airweave® y lo suficientemente alejadas de los laminados tal y como se muestra en la Figura 2.10.



Figura 2.10 Colocación de la capa de Airweave y las tomas de vacío.

6. Recubrimiento de toda la zona con la bolsa de vacío, asegurándose de que la unión de ésta con la cinta de cromato sea lo suficientemente estanca como para que no se produzcan fugas de aire durante el proceso de vacío.
7. Una vez terminado todo este proceso, se hacen unos pequeños agujeros en el plástico en los huecos de las tomas de vacío y se conectan a éstas unas gomas habilitadas en la sala limpia que aplicarán el vacío, quedando el resultado final como el que se muestra en la Figura 2.11.



Figura 2.11 Bolsa de vacío terminada y lista para introducirla en la máquina de autoclave.

El motivo por el que se utilizan las bolsas de vacío es por su buena resistencia mecánica y química, su buena elongación y su no porosidad, permitiendo así aislar al material compuesto de las partículas suspendidas en el aire y de que el propio aire se introduzca entre las láminas. A su vez, lo protege de las variaciones de presión y

temperatura a las que se ve sometido en la máquina de autoclave.

Por otro lado, habría que resaltar que en el proceso de fabricación de la bolsa de vacío, antes de cubrir los laminados con las capas de teflón por ambos lados, es recomendable recubrir el perímetro de los paneles con corcho con el fin de impedir que la resina fluya demasiado durante el proceso de curado en autoclave. En nuestro caso, este corcho no se colocó y esto perjudicó a uno de los laminados, como se verá más adelante.

2.1.4 Autoclave

Una vez terminada la bolsa de vacío, el resultado debe ser como el mostrado en la Figura 2.11, de forma que el material ya está listo para ser introducido en la máquina de autoclave, que se encargará del curado de los materiales.

La máquina de autoclave (mostrada en la Figura 2.12) está compuesta de unas paredes gruesas con un cierre hermético que permite trabajar a altas presiones y temperaturas para curar los materiales. Cada material tiene unos valores especificados por el fabricante de presión y temperatura a los que debe ser curado. La temperatura y presión irán aumentando hasta alcanzar los valores indicados y una vez alcanzados, se mantendrán el tiempo necesario. Para que el proceso sea exitoso, es importante que la bolsa de vacío se haya realizado correctamente y no existan pérdidas de presión ni haya fugas de aire.



Figura 2.12 Máquina de autoclave.

2.1.5 Obtención de los paneles

Tras la finalización del proceso de curado, se extrae la plancha del autoclave. En la Figura 2.13 se puede observar que tras extraer la plancha, en una de las esquinas del material de 30 gsm aparece una mancha debido a que la resina ha fluido demasiado. Esto se debe al error cometido durante el proceso de fabricación de la bolsa de vacío, en el que no se protegió a los laminados con corcho. Al retirar la bolsa de vacío se observan daños en la esquina del material en la que se encontraba la mancha y por tanto se desechará esa parte del material (aproximadamente unos 3 o 4 cm del ancho del laminado).

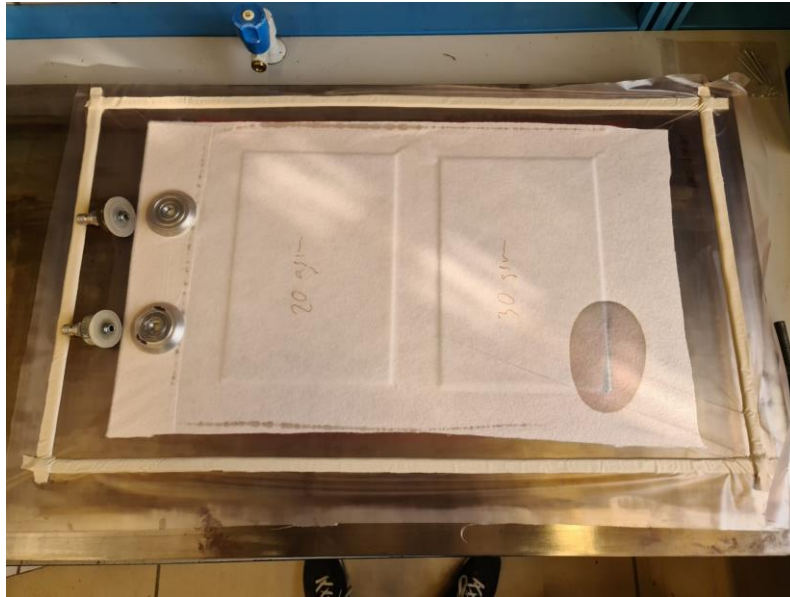


Figura 2.13 Plancha metálica con los laminados curados justo a la salida del autoclave.



Figura 2.14 Material dañado tras retirar la bolsa de vacío.

A excepción de este fallo observado en el laminado de 30 gsm, los paneles están curados y listos para trabajar con ellos. El siguiente paso será resanarlos y fabricar los tacos de refuerzo para poder obtener probetas para ensayos.

2.2 Fabricación de tacos

El siguiente paso será fabricar los tacos haciendo uso de las medidas obtenidas tras el curado de los laminados. Los tacos tienen como función proteger al laminado y servir de agarre de cara al ensayo de tracción. Los tacos se obtienen de paneles hechos de fibra de vidrio que ya se nos han facilitado fabricados y por tanto lo único que

habrá que hacer con ellos es lijarlos y cortarlos para su posterior unión con los laminados. En la Figura 2.15 se observa un panel de fibra de vidrio que se utilizó como material de partida para la fabricación de los tacos.

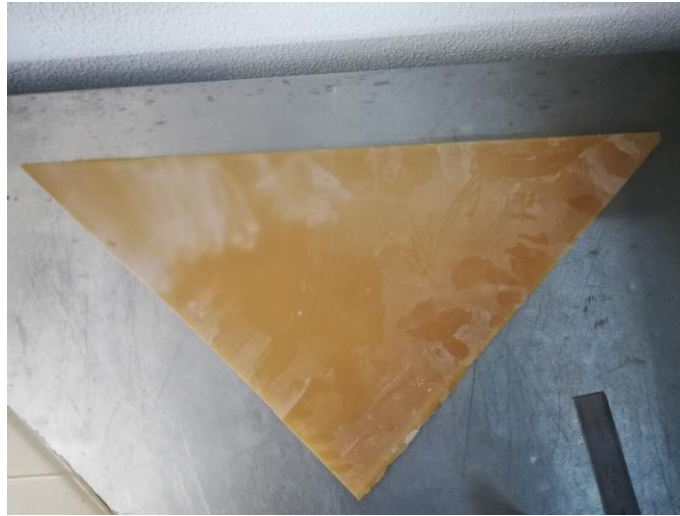


Figura 2.15 Panel de partida de fibra de vidrio.

2.2.1 Lijado

A modo de simplificar el proceso de fabricación de los tacos, antes de cortar el panel es recomendable lijarlo.



Figura 2.16 Máquina de lijado mediante una pistola de arena.

Tal y como se puede observar en la Figura 2.16, la máquina utilizada para el lijado de los materiales ha sido una pistola de arena (chorro de arena). El proceso consiste en meter las manos por los agujeros habilitados para poder

manipular los laminados y coger la pistola de arena, con la que se lija el material apuntando el chorro de arena a presión sobre las zonas del panel que se van a utilizar para los tacos. En la parte superior hay un cristal que actúa a modo de protección y facilita la visión de todo el proceso.

2.2.2 Máquina de corte

Una vez que el panel de fibra de vidrio se ha lijado, el siguiente paso es cortarlo de forma que, para cada panel, se obtengan 4 tacos con las mismas dimensiones (largo del laminado por 50 mm de ancho). Para este proceso se ha hecho uso de la máquina de corte mostrada en la Figura 2.17, compuesta de un disco de diamante que corta por abrasión. Para cortar el material se coloca éste en una bancada que avanza manualmente hacia el disco, con una placa metálica y un calibre que se utilizan de referencia para realizar el corte con las medidas deseadas.



Figura 2.17 Máquina de corte.



Figura 2.18 Tacos cortados y lijados y laminados lijados.

En la Figura 2.18 se observa cómo el panel de 30 gsm es más pequeño que el de 20 gsm y esto se debe a la imperfección que apareció tras el ciclo de curado de autoclave, que nos obligó a cortar la franja de material dañada, como ya se comentó anteriormente. Por tanto, las medidas de los tacos son 300x50 mm² para el 20 gsm y 250x50 mm² para el 30 gsm.

Es importante recordar que para el correcto uso de la máquina de corte es necesario utilizar un equipo de protección, formado por una bata, botas, guantes y mascarilla para protegerse del polvo de material compuesto que se desprende tras la abrasión. Además, mientras se esté utilizando la máquina, debe estar encendido un aspirador para absorber ese polvo, también cada vez que se vaya a cortar se debe abrir una llave de agua para refrigerar la máquina y al terminar de usarla es conveniente limpiarla y retirar los trozos de material que hayan podido aparecer.

2.3 Fabricación de probetas

El último paso consiste en la obtención de las probetas de material compuesto, con las que posteriormente se ensayará y se estudiará el material. Este proceso final consiste en resanar los paneles para quitar la resina que haya podido aparecer y dejar los paneles lo más rectangulares posible y con un buen acabado, lijar las zonas del panel que van a estar en contacto con los tacos y pegarlos con la mayor exactitud posible mediante un adhesivo.

2.3.1 Resanado y lijado de paneles

Por tanto, para el resanado se utilizará la misma máquina de corte que se utilizó para el corte de los tacos. Tal y como se puede observar en la Figura 2.19, para resanar las láminas lo ideal es realizar primero un corte lo más recto posible en uno de los lados más largos de la lámina sin quitar mucho material, pero dejando un buen acabado, y usar ese lado de apoyo y referencia para el corte de los demás lados.

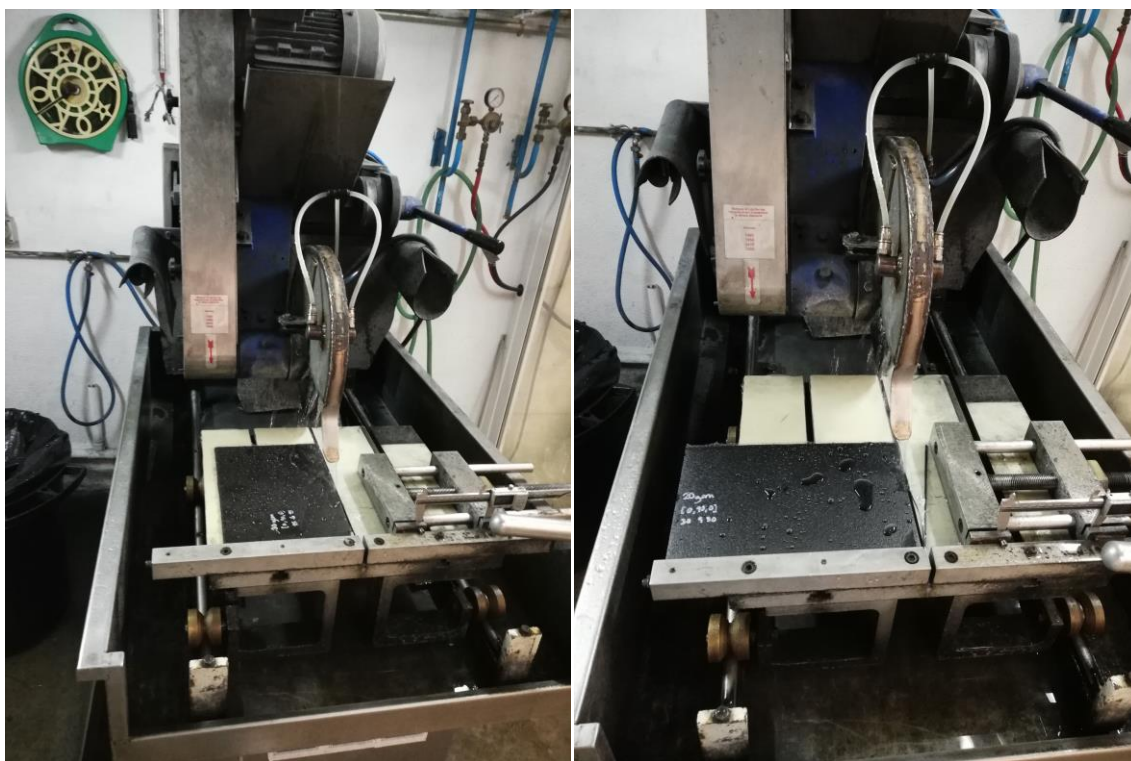


Figura 2.19 Resanado de los laminados en la máquina de corte.

Una vez resanadas, habrá que lijar los laminados por las zonas que van a estar en contacto con los tacos. Para ello, se colocan unas cintas que delimiten la zona donde se van a pegar los tacos y se repite el proceso de lijado realizado para los tacos con la pistola de arena de la Figura 2.16. El resultado final se observa en la Figura 2.18, donde se aprecia perfectamente la zona que ha sido lijada y la que no.

2.3.2 Unión y curado de tacos y paneles con prensa de platos calientes

Una vez que tanto los tacos como los laminados han sido lijados, se limpian con alcohol las caras que van a estar en contacto para que no quede ningún resto de suciedad y se coloca un adhesivo entre ambas superficies. Antes de colocar este adhesivo, ha debido ser cortado de tal forma que tenga unas dimensiones un poco más pequeñas que el propio taco, pues durante el proceso de unión, el adhesivo fluirá y así se evita que no rebose. En la Figura 2.20 se pueden observar dos de los tacos con el adhesivo ya colocado y pegado por uno de los lados, donde a uno de ellos le falta retirar la cinta amarilla que protege el otro lado del adhesivo para pegarlo al laminado.



Figura 2.20 Colocación del adhesivo en los tacos.

Una vez colocado el adhesivo en todos los tacos, se colocan en sus respectivas posiciones de los laminados. El resultado final, previo al prensado se muestra en la Figura 2.21.

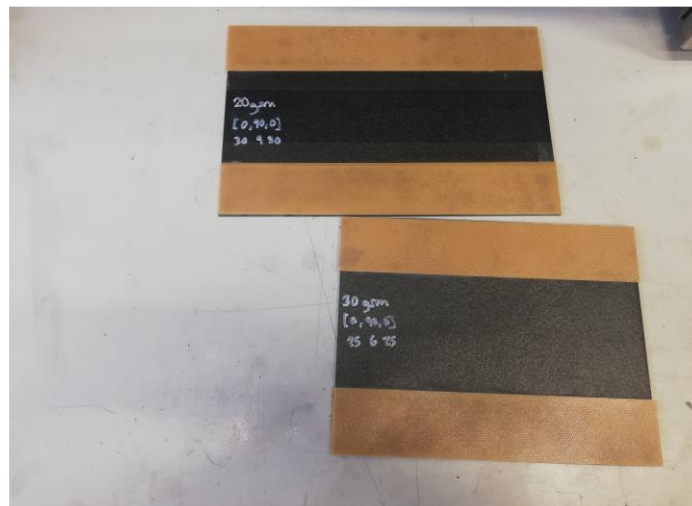


Figura 2.21 Colocación de los tacos sobre los laminados con el adhesivo, antes del prensado.

Una vez terminado este proceso, el siguiente paso es curarlo en la prensa hidráulica para que el adhesivo cumpla su función y los tacos queden completamente pegados. La prensa utilizada es capaz de controlar la presión y la temperatura de forma que éstas sean las adecuadas, es decir, las que especifica el propio fabricante del adhesivo y en función del área afectada por la presión durante el prensado.



Figura 2.22 Prensa Hidráulica.

La prensa de platos calientes utilizada está pensada para llevar un control adecuado para cargas altas, sin embargo, las cargas que se tienen que utilizar para este proceso son pequeñas y esto complica un poco el mantener la carga constante y con el valor adecuado. Por este motivo, se ha incorporado a la prensa una pequeña palanca manual, tal y como se puede observar en la Figura 2.22, con la que se puede controlar manualmente la presión a la que están siendo sometidos el conjunto de tacos y laminado. Para llevar a cabo el control de la presión ejercida se utiliza el aparato electrónico de la Figura 2.23, denominado puente de Wheatstone.

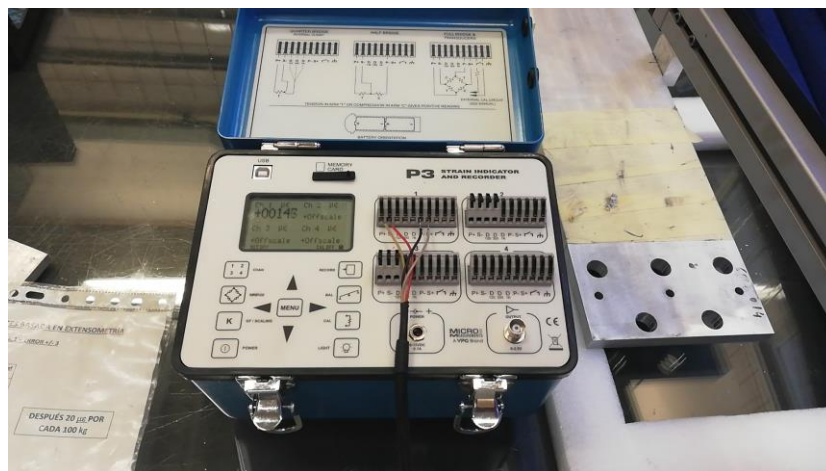


Figura 2.23 Puente de Wheatstone.

En realidad, el Strain Recorder lleva a cabo el control de la deformación de los platos de la prensa a través de unas galgas extensométricas colocadas. Para ello, hay que aplicar una calibración de la carga de la prensa basada

en la extensometría. En primer lugar, calculamos la carga a la que los tacos necesitan estar sometidos para pegarse correctamente. La fórmula que hay que aplicar es la siguiente:

$$Carga = [0.1 \times bar \times \text{Área} (mm^2)] \div 9.8 [kg]$$

donde la variable *bar* es un número ofrecido por el fabricante del adhesivo que indica la presión ideal en bares a la que se tiene que someter el adhesivo para su correcto funcionamiento (en este caso 2.4 bares) y el *Área* indica la superficie que está sometida a dicha presión, en contacto con los platos de la prensa. El área para cada material es diferente, pues el de 30 gsm tuvo que ser recortado por el fallo en la fabricación tras el ciclo de curado en autoclave:

$$\begin{cases} 20 \text{ gsm} \rightarrow \text{Área} = 297 \times 50 \times 2 = 29700 \text{ mm}^2 \\ 30 \text{ gsm} \rightarrow \text{Área} = 250 \times 50 \times 2 = 25000 \text{ mm}^2 \end{cases}$$

Por tanto, las cargas que hay que aplicar correspondientes a cada panel son:

$$\begin{cases} 20 \text{ gsm} \rightarrow Carga = (29700 \times 0.1 \times 2.4) \div 9.8 = 727,35 \text{ kg} \\ 30 \text{ gsm} \rightarrow Carga = (25000 \times 0.1 \times 2.4) \div 9.8 = 612,25 \text{ kg} \end{cases}$$

Una vez tenemos los kg necesarios, a través de la tabla de la Figura 2.24 se pueden obtener las microdeformaciones que debería registrar el puente de Wheatstone, donde se ha aplicado un factor de galga de 0.5.

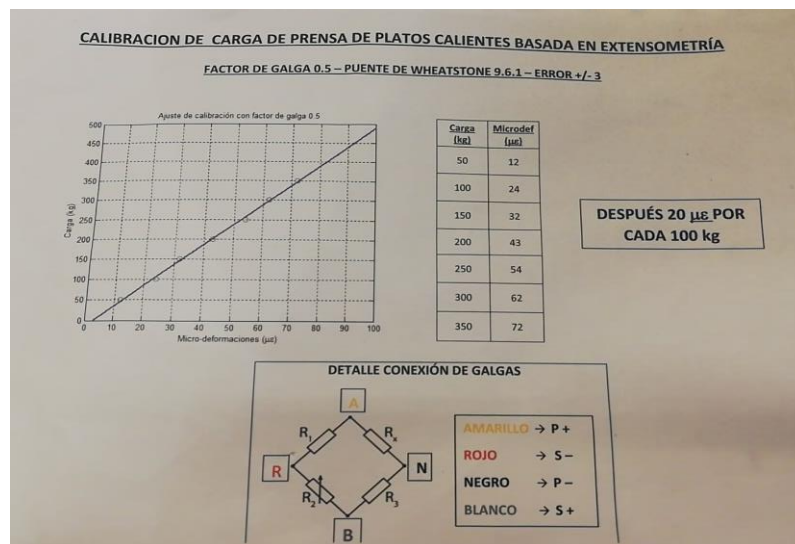


Figura 2.24 Tabla de calibración basada en extensometría.

Por tanto, las microdeformaciones necesarias para el correcto desarrollo del proceso de pegado por prensado con platos calientes son:

$$\begin{cases} 20 \text{ gsm} \rightarrow \mu\epsilon = 145,47 \\ 30 \text{ gsm} \rightarrow \mu\epsilon = 122,45 \end{cases}$$

Por lo tanto, el proceso consistirá en colocar cada laminado ya con los tacos y el adhesivo lo más centrado posible en los platos de la prensa, aplicar la temperatura que le corresponda al proceso y mediante la palanca hidráulica ir controlando que las microdeformaciones mostradas por el puente de Wheatstone sean las deseadas, con una tolerancia de $\pm 5 \mu\epsilon$.

Para que el proceso se lleve a cabo correctamente hay que aplicar la presión durante una hora y media para cada laminado y con los platos a una temperatura de 120° . A modo de protección se debe colocar un plástico recubriendo toda la pieza para que no queden restos de adhesivo o de suciedad pegados en los platos de la prensa.

El resultado final se puede observar en la Figura 2.25, donde los tacos ya están perfectamente pegados a los laminados, listos para ser cortados y obtener las probetas que buscábamos. En la figura también se puede observar cómo ha aparecido un poco de rebaba del adhesivo, que posteriormente será retirada de los extremos usando la máquina de corte y pulida para dejar un mejor acabado.



Figura 2.25 Unión final entre los tacos y los laminados.

2.3.3 Obtención de probetas

Por último, una vez obtenidos los dos materiales ya fabricados y con los tacos pegados, lo único que faltaría es cortar los laminados para obtener las probetas con las que posteriormente se trabajará. Para el corte de material se volverá a utilizar la máquina de corte de la Figura 2.19. En primer lugar, resanamos los bordes en los que están los tacos tal y como habíamos mencionado anteriormente, para poder utilizar dichas caras como apoyo para los cortes. Una vez resanadas, se procede al corte, intentando que todas las probetas tengan aproximadamente 25 mm de ancho. Para intentar que estas medidas sean lo más precisas posible, se ajusta el calibre antes del corte, y después del corte se mide con otro calibre manual para comprobar si hay que hacer alguna modificación al calibre de la máquina.

Una vez que todas las probetas han sido cortadas, se enumeran para identificar su posición original en el panel y el material al que pertenecen. Al final del proceso de corte se obtienen 9 probetas del material de 30 gsm y 10 probetas del material de 20 gsm, de las cuales una de ellas fue dañada durante el corte y no podrá ser utilizada (la numerada como 20i). En la Figura 2.26 se pueden observar las probetas obtenidas finalmente y la numeración asignada: por un lado, 20 o 30 en función de si el material es de 20 gsm o 30 gsm y por otro lado, de la “a” a la “j” en el de 20 y de la “a” a la “i” en el de 30.



Figura 2.26 Probetas obtenidas de los laminados fabricados.

3 CARACTERIZACIÓN DE LOS LAMINADOS

Una vez obtenidas las probetas con las que se va a trabajar, el siguiente paso es realizar los ensayos mecánicos de caracterización. Estos ensayos consisten en pruebas a las que se someten los laminados con el fin de estudiar sus propiedades mecánicas. En particular, el ensayo mecánico que se ha llevado a cabo en este proyecto ha sido el ensayo de tracción. En este apartado se va a realizar la caracterización de los laminados a rotura.

La máquina de ensayos de tracción empleada tiene conectado un extensómetro y, además, tiene asociado un software que nos permite realizar un control preciso de la carga aplicada, la velocidad de aumento o descenso de la carga y recopilar los datos tanto de la carga como de la deformación asociada a dicha carga. En particular, la máquina utilizada es la mostrada en la Figura 3.1 y se trata de una máquina universal de ensayos Instron 4483, con una célula de carga de 15000 kg.



Figura 3.1 Máquina Universal de Ensayos Instron 4483.

Para el análisis de tensión a rotura se han ensayado en total 8 probetas, 4 probetas obtenidas del panel fabricado con el material de 20 gsm y otras 4 del de 30 gsm. El objetivo de estos ensayos es obtener de forma aproximada la carga de rotura de cada laminado fabricado para así, a la hora de trabajar con las siguientes probetas del mismo laminado, tener una referencia del nivel de carga al que van a romper. Para poder llevar a cabo estos ensayos de tracción, hay que seguir el siguiente procedimiento:

1. Elección de las mordazas correspondientes al espesor y forma de nuestras probetas, para garantizar la correcta sujeción en los tacos. En nuestro caso, las mordazas elegidas tienen una apertura de 0-6 mm y una superficie plana.
2. Elección de las patillas del extensómetro adecuadas para el correcto agarre de éste a las probetas y poder garantizar así su correcto funcionamiento.
3. Encendido del ordenador, de la máquina de ensayo y calibración y balanceo de ésta última.
4. Colocación correcta de la probeta en las mordazas, bien sujeta, centrada en el centro de las mordazas y perfectamente alineada. Esta alineación de la probeta se realizó a ojo, con mucha delicadeza y tomando de referencia las esquinas verticales de los pilares del laboratorio. También hay que asegurarse que la mordaza superior e inferior se encuentran a una distancia adecuada, de tal forma que agarren

correctamente los tacos de la probeta.

5. Una vez bien colocada la probeta, se aprietan ambas mordazas y se verifica que la probeta se encuentra centrada y totalmente vertical.
6. A continuación, se coloca el extensómetro sujetándolo con delicadeza y precisión, más tarde habrá que balancear la medida del extensómetro en el ordenador y resetear la representación gráfica. En la Figura 3.2 se puede observar la probeta ya perfectamente colocada, con el extensómetro puesto y lista para empezar a ser ensayada.



Figura 3.2 Probeta con extensómetro colocada en la máquina de ensayo.

7. Para empezar a cargar, se hace uso del programa Test Control Instron Series 44 v17-6, que permite llevar el control de la carga en el ordenador. Una vez dentro del programa, habría que conectar la máquina de tracción al ordenador y seleccionar la opción de ensayo de tracción, en particular, ensayo de tracción en probetas de sección rectangular con extensómetro. Dado que el ensayo se realiza con control en desplazamientos, habrá que fijar una velocidad, que rondará entre 0.5 y 2 mm/min.
8. Una vez terminado el ensayo, se guardan los datos obtenidos. Estos datos son los registrados por el programa y se corresponden con la carga aplicada, el desplazamiento de la cruceta y la deformación del extensómetro.

Estos pasos descritos se llevarán a cabo cada vez que se vaya a ensayar una probeta. Para el caso de ensayos a rotura correspondiente a este apartado, la colocación del extensómetro no es necesaria, pues lo único que buscamos es la carga a la que rompen las probetas.

Una vez que ha quedado claro el funcionamiento de la máquina de ensayos, el siguiente paso es realizar los ensayos correspondientes con el fin de obtener un valor aproximado de la tensión máxima de rotura para cada laminado. Por tanto, de las 9 probetas iniciales obtenidas de cada laminado, 4 de ellas serán ensayadas a rotura. Para ello, se han realizado las medidas del ancho y espesor de cada probeta a ensayar, cuyos resultados se observan en las Tablas 3.1 y 3.2.

Es importante recalcar que las propiedades que se van a obtener en este apartado son aparentes, pues no estamos trabajando con un material, si no con el laminado que hemos fabricado.

Tabla 3.1 Medidas de probetas de 20 gsm ensayadas a rotura.

Probeta	Espesor (mm)	Ancho (mm)	Longitud (mm)	Área (mm ²)
20 e	1.91	25.017	50	47.782
20 f	1.92	24.933	50	47.871
20 g	1.91	25.017	50	47.782
20 h	1.92	24.863	50	47.737

Tabla 3.2 Medidas de probetas de 30 gsm ensayadas a rotura.

Probeta	Espesor (mm)	Ancho (mm)	Longitud (mm)	Área (mm ²)
30 a	2.13	24.627	50	52.455
30 c	2.12	23.803	50	50.462
30 d	2.13	23.957	50	51.028
30 e	2.14	23.881	50	51.105

Es importante resaltar que estas medidas se han obtenido haciendo la media aritmética de 3 medidas diferentes, en los extremos libres de los tacos y el centro de la probeta. Además, las probetas que se han medido son únicamente las que posteriormente van a ser ensayadas a rotura, pues el resto de las probetas se medirán una vez realizado el pulido, por si éste afecta a sus dimensiones.

Además de la carga a rotura de cada probeta, también será interesante obtener el valor medio, la desviación típica y el coeficiente de variación respecto a la media de los resultados obtenidos en distintas probetas del mismo material. Para ello, se aplicarán las siguientes fórmulas:

- Valor medio:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}$$

- Desviación típica:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}}$$

- Coeficiente de variación respecto a la media:

$$C.V. = \frac{\sigma}{\bar{X}} \times 100$$

Además, como sabemos que la tensión viene definida como $\sigma = F/A$, haciendo uso de las áreas calculadas anteriormente también se obtienen los valores de las tensiones máximas a rotura. Una vez explicado todo esto, se ensayan las probetas. A continuación, se muestran los resultados de los ensayos para cada panel.

3.1 Caracterización del panel de 20 gsm

En primer lugar, se van a analizar los resultados obtenidos de los ensayos realizados a las probetas de los paneles de 20 gsm. Los resultados de estos ensayos están recogidos en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3 Resultados obtenidos en los ensayos a rotura en probetas de 20 gsm.

Probeta	F_R (N)	σ_R (MPa)	Módulo de Young (GPa)
20 e	62411.22	1306.153	88,622
20 f	60772.95	1269.505	-
20 g	53229.06	1113.987	-
20 h	55338.21	1159.232	-

En esta tabla se observa que sólo se obtuvo el Módulo de Young para la probeta 20 e, debido a que fue la única probeta en la que se utilizó el extensómetro antes de romperla. Una vez obtenidos los datos de los ensayos a rotura de las probetas de 20 gsm, se calcula el valor medio, desviación típica y coeficiente de variación respecto a la media de la carga de rotura. Estos datos se muestran en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4 Cálculos de los ensayos a rotura en probetas de 20 gsm.

Panel de 20 gsm	F_R (N)	σ_R (MPa)
Valor Medio	57937.86	1212.219
Desviación Típica	2516.162	52.241
Coef. De Variación	4.343	4.340

De esta última tabla se obtiene un valor medio para la fuerza de rotura de 57937,86 N y un coeficiente de variación razonablemente pequeño. No se ha podido realizar cálculos con el Módulo de Young al tener sólo datos de una probeta.

3.2 Caracterización del panel de 30 gsm

En segundo lugar, se analizan los resultados obtenidos de los ensayos realizados a las probetas de los paneles de 30 gsm. Los resultados de estos ensayos están recogidos en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5 Resultados obtenidos en los ensayos a rotura en probetas de 30 gsm.

Probeta	F_R (N)	σ_R (MPa)	Módulo de Young
---------	-----------	------------------	-----------------

	(GPa)		
30 a	45253.53	862.703	-
30 c	61528.32	1219.291	100,086
30 d	58742.28	1151.168	100,420
30 e	64088.73	1254.051	-

En este caso sólo se tomaron datos con el extensómetro en las probetas 30 c y 30 d, por lo que son las únicas en las que se ha calculado el Módulo de Young. Repetimos de nuevo los cálculos realizados para el panel de 20 gsm con los datos obtenidos en este nuevo panel. Los datos se muestran en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6 Cálculos de los ensayos a rotura en probetas de 30 gsm

Panel de 30 gsm	F_R (N)	σ_R (MPa)	Módulo de Young (GPa)
Valor Medio	57403.215	1121.803	100,253
Desviación Típica	4843.329	102.734	0,236
Coef. De Variación	8.437	9.158	0,235

Analizando los resultados, se observa una fuerza de rotura de 57403,215 N, bastante parecida a la del panel de 20 gsm, aunque el coeficiente de variación es el doble debido a una variación de casi 2 toneladas entre la fuerza de rotura de las probetas 30 a y 30 e. Respecto al Módulo de Young, se observa unos valores prácticamente iguales en las dos únicas probetas en las que se tomaron datos con el extensómetro.

4 LIJADO Y PULIDO DE LAS PROBETAS

Una vez que ya se tiene una referencia aproximada de la carga a la que rompen las probetas de cada material, se pretende estudiar la aparición y el crecimiento del primer daño en la capa de 90° a lo largo del espesor de la probeta. Para ello, se va a aplicar un incremento gradual de la carga (con pequeños incrementos de ésta) descargando la probeta en cada incremento para su observación en el microscopio óptico, hasta observar la aparición del primer daño. Una vez observado este primer daño, se aumenta la carga para observar su crecimiento hasta la rotura de la probeta. Para poder observar correctamente al microscopio el daño, hay que lijar y pulir las probetas por uno de los cantos.

Por tanto, el siguiente paso será lijar y pulir las 10 probetas restantes que nos quedan (5 de cada material). Para llevar a cabo el lijado y el pulido de las probetas se ha hecho uso de la máquina que se puede observar en la Figura 4.1, compuesta por un disco rotatorio sobre el que se colocan las lijas, los paños de pulido que se vayan a utilizar, un grifo de agua para el lijado y una caja que controla las revoluciones por minuto del disco y el fluido y la cantidad de éste que se suministra durante el pulido.



Figura 4.1 Máquina utilizada para el lijado y pulido.

El proceso del lijado y pulido resultó más complicado de lo previsto y llevó bastante tiempo encontrar la secuencia de lijas, paños y los tiempos adecuados para cada una. Otro de los problemas encontrados fue que el taco metálico mostrado en la Figura 4.1, sobre el que se apoya la probeta para la realización del proceso, pasaba justo por el centro del disco y eso perjudicaba a la superficie lijada, sobre la que aparecían numerosos daños y un lijado poco uniforme. Al adelantar el taco metálico se observó una mejora considerable.

El orden de las lijas utilizadas y la secuencia correspondiente durante el proceso del lijado son los siguientes:

- **Lija de 320 μm :**
 - Se coloca el soporte rojo de la Figura 4.2 concéntricamente con el disco de la máquina y encima la lija de Carburo de Silicio de grano 320 μm .



Figura 4.2 Soporte rojo sobre el que se colocan las lijas.

- Se abre la llave de paso del agua.
- Se fijan las revoluciones y el tiempo correspondientes de esta lija: 300 rpm durante 4 minutos.
- Se pone en marcha pulsando el botón verde de la máquina y se mantiene la probeta apoyada en la pieza metálica, aplicando una ligera presión para asegurar el correcto lijado y moviendo levemente la probeta hacia los extremos del disco para que el lijado sea lo más uniforme posible.
- **Lija de 500 μm :**
 - Se coloca de nuevo el soporte rojo de la Figura 4.4 y encima, la lija de Carburo de Silicio de grano 500 μm .
 - Se abre la llave de paso del agua.
 - Se fijan las revoluciones y el tiempo de aplicación: 300 rpm durante 3 minutos
 - Se pone en marcha y se repite el mismo movimiento que en el paso anterior.
- **Lija de 800 μm :**
 - Se coloca de nuevo el soporte rojo y encima la lija de Carburo de Silicio de grano 800 μm .
 - Se abre la llave de paso del agua.
 - Se fijan las revoluciones y el tiempo de aplicación: 300 rpm durante 2 minutos.
 - Se pone en marcha y se repite el mismo movimiento que en el paso anterior.
- **Lija de 1200 μm :**
 - Se coloca de nuevo el soporte rojo y encima la lija de Carburo de Silicio de grano 1200 μm .
 - Se abre la llave de paso del agua.
 - Se fijan las revoluciones y el tiempo de aplicación: 300 rpm durante 6 minutos
 - Se pone en marcha y se repite el mismo movimiento que en el paso anterior.

Las lijas utilizadas a lo largo del proceso se muestran en la Figura 4.3. De izquierda a derecha son las lijas de 320 μm , 500 μm , 800 μm y 1200 μm .



Figura 4.3 Lijas utilizadas.

Una vez finalizado el proceso del lijado, se pasó al pulido. El orden de los paños de pulido utilizados y la secuencia correspondiente durante el proceso del pulido fueron los siguientes:

- **Paño MD-Largo:**
 - Se coloca directamente sobre el disco circular el paño MD-Largo.
 - Se fijan las revoluciones y el tiempo correspondientes a este paño: 150 rpm durante 8 minutos.
 - Se pone en marcha la máquina, se activa el goteo del líquido que le corresponde a cada paño y, una vez que el paño esté húmedo por completo, se comienza con el proceso de pulido repitiendo el movimiento de la probeta realizado en el lijado.
- **Paño MD-Dac:**
 - Se coloca el paño MD-Dac.
 - Se fijan las revoluciones y el tiempo correspondientes a este paño: 150 rpm durante 6 minutos.
 - Se pone en marcha la máquina, se activa el goteo del líquido que le corresponde a cada paño y, una vez que el paño esté húmedo por completo, se comienza con el proceso de pulido repitiendo el movimiento de la probeta realizado en el lijado.
- **Paño MD-Nap:**
 - Se coloca el paño MD-Nap.
 - Se fijan las revoluciones y el tiempo correspondientes a este paño: 150 rpm durante 4 minutos.
 - Se pone en marcha la máquina, se activa el goteo del líquido que le corresponde a cada paño y, una vez que el paño esté húmedo por completo, se comienza con el proceso de pulido repitiendo el movimiento de la probeta realizado en el lijado.

Los paños utilizados a lo largo del proceso se muestran en la Figura 4.4. Arriba a la derecha se encuentra el paño MD-Largo, abajo el de MD-Dac y arriba a la izquierda el de MD-Nap.



Figura 4.4 Paños utilizados.

El resultado que se observa en el microscopio tras cada paso se muestra a continuación en las Figuras 4.5 - 4.11.

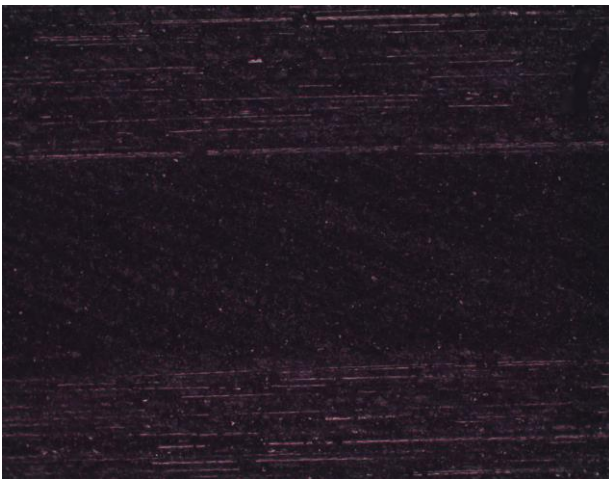


Figura 4.5 Observaciones al microscopio con distintos aumentos tras la lija de 320 μm .

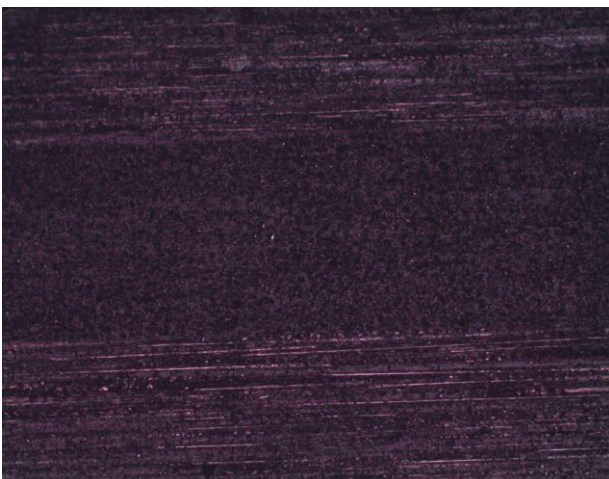


Figura 4.6 Observaciones al microscopio con distintos aumentos tras la lija de 500 μm .

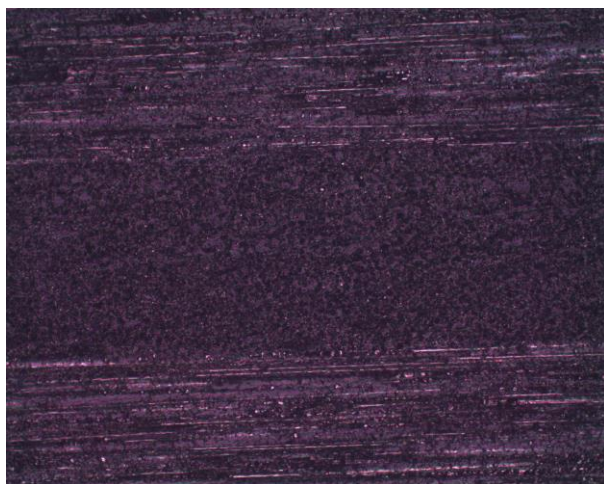


Figura 4.7 Observaciones al microscopio con distintos aumentos tras la lija de 800 μm .

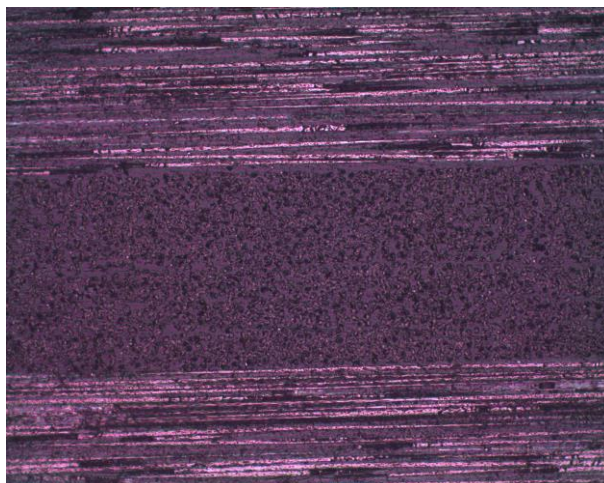


Figura 4.8 Observaciones al microscopio con distintos aumentos tras la lija de 1200 μm .

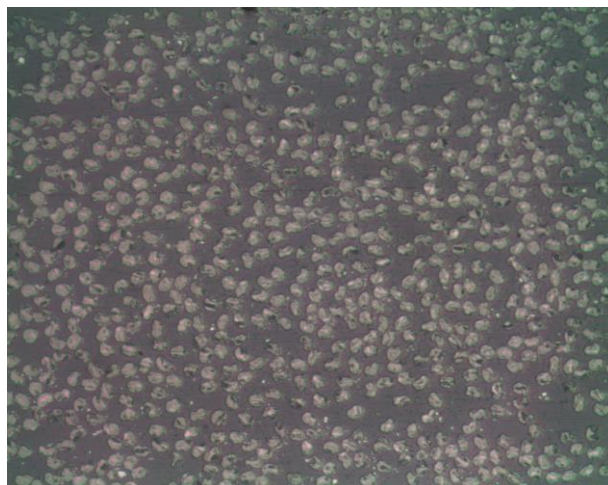
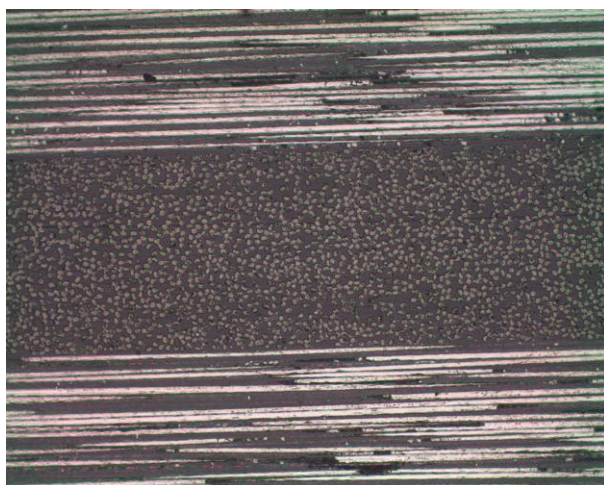


Figura 4.9 Observaciones al microscopio con distintos aumentos tras el paño MD-Largo.

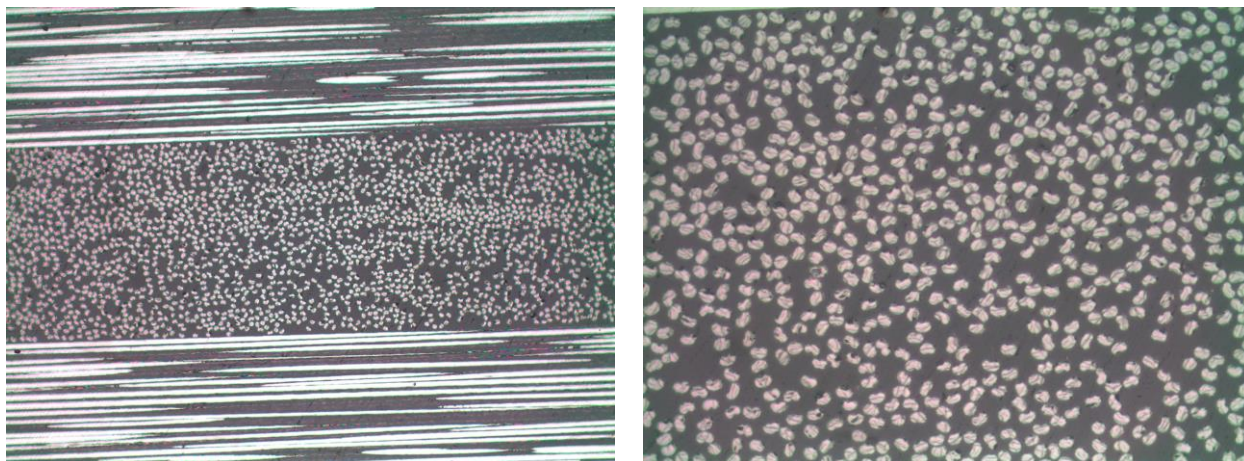


Figura 4.10 Observaciones al microscopio con distintos aumentos tras el paño MD-Dac.

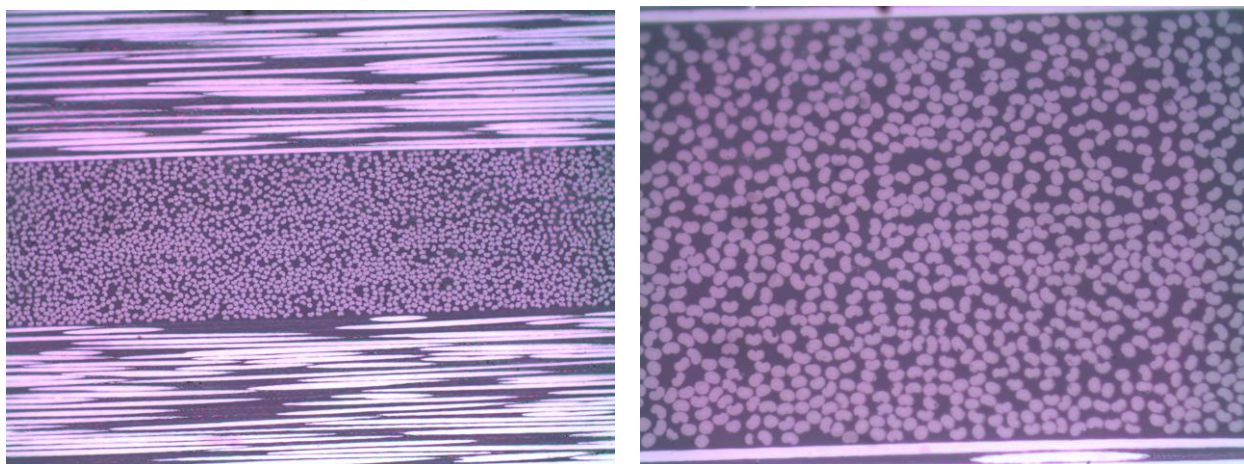


Figura 4.11 Observaciones al microscopio con distintos aumentos tras el paño MD-Nap.

Habría que destacar que no todas las probetas obtuvieron un resultado final tan bueno como el de la Figura 4.11 tras el lijado y pulido, lo que dificultará más adelante el encontrar los primeros despegues.

Antes de pasar al siguiente apartado, hay que destacar que lo primero que llama la atención al observar las fibras de la capa de 90 al microscopio es la sección en forma de riñón de la mayoría de ellas. En la imagen de la Figura 4.12, se observa cómo fibras con dicha forma peculiar se encuentran mezcladas con otras circulares.

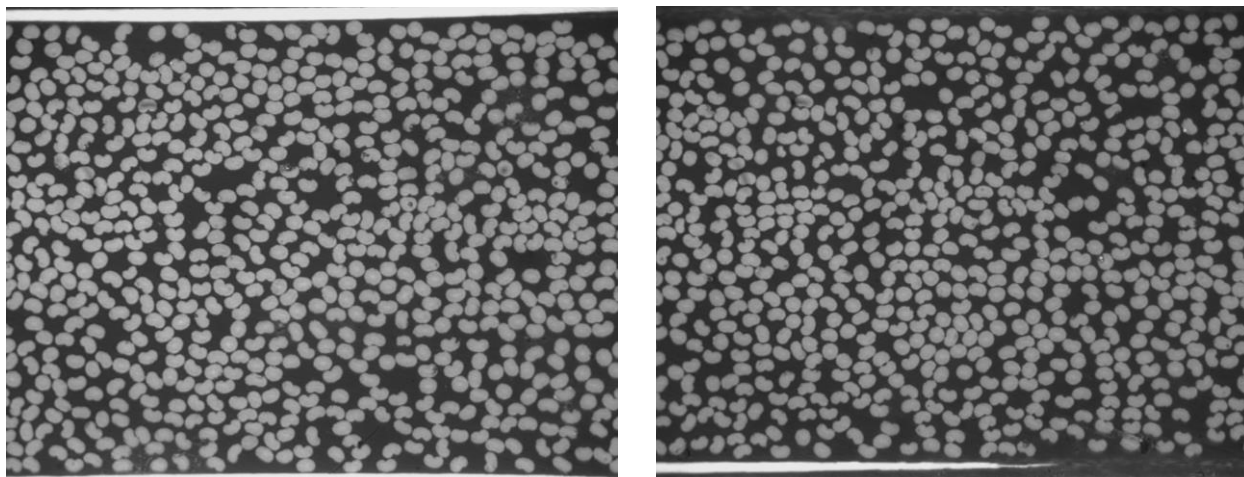


Figura 4.12 Observaciones al microscopio de las fibras en la capa de 90.

Por otro lado, también habría que comentar la detección de grietas sin haber comenzado a cargar la probeta. En un principio todas las probetas tenían grietas longitudinales en las interfases entre la capa de 90 y la de 0, como las de la Figura 4.13, pero tras observar todas las probetas, aparecieron también grietas tanto transversales como longitudinales en el centro de la capa de 90, como las de las Figuras 4.14 y 4.15.

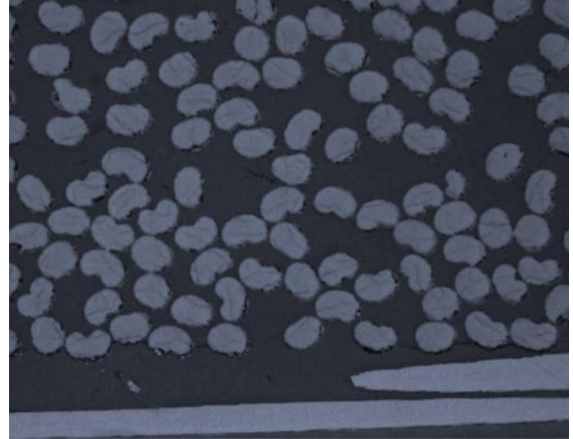
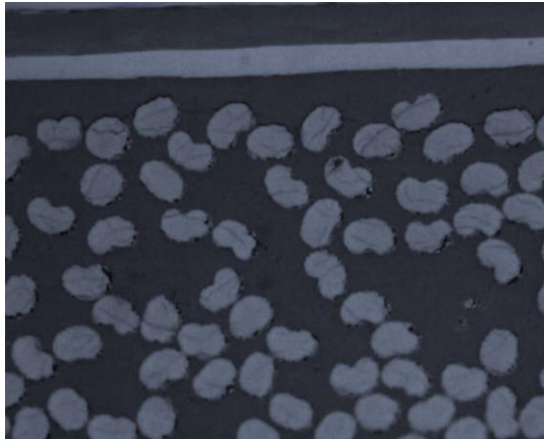


Figura 4.13 Observaciones al microscopio de grietas en los extremos de la capa de 90.

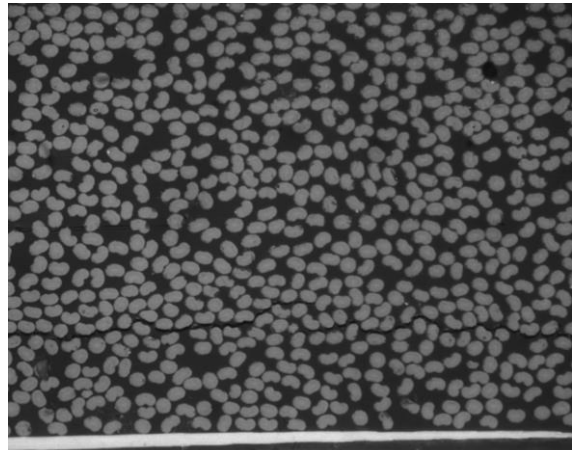
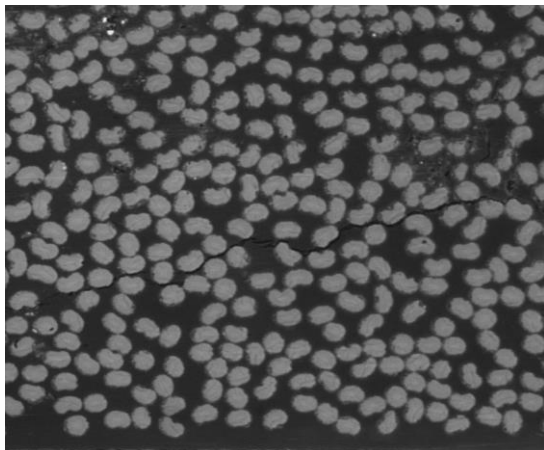


Figura 4.14 Observaciones al microscopio de grietas horizontales en el centro de la capa de 90.

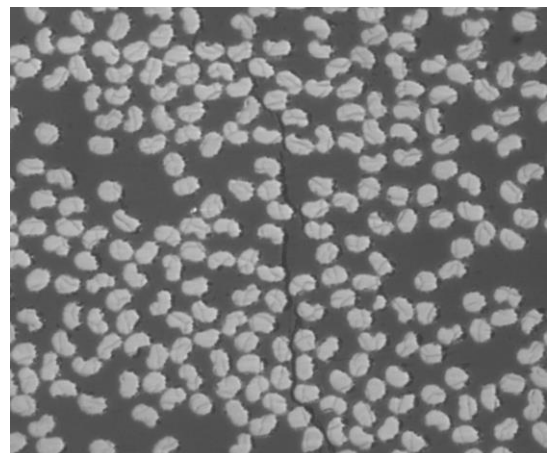
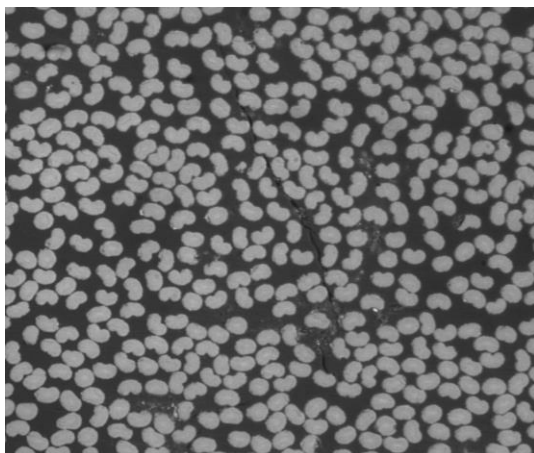


Figura 4.15 Observaciones al microscopio de grietas verticales en el centro de la capa de 90.

También habría que destacar la aparición de un posible poro en el panel fabricado con el material 30 gsm. A simple vista no se apreciaba nada, pero al observar al microscopio las probetas 30 c y 30 d, dicho defecto se pudo ver claramente (Figuras 4.16 y 4.17).

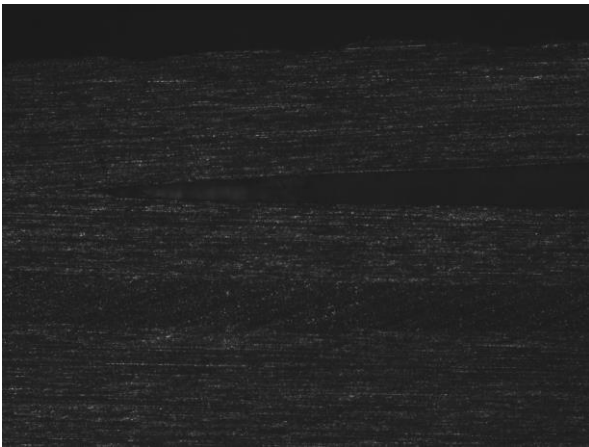


Figura 4.16 Gran hueco en la probeta 30 c.

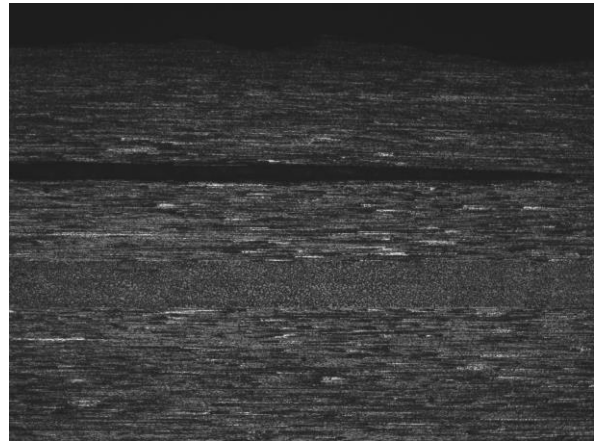
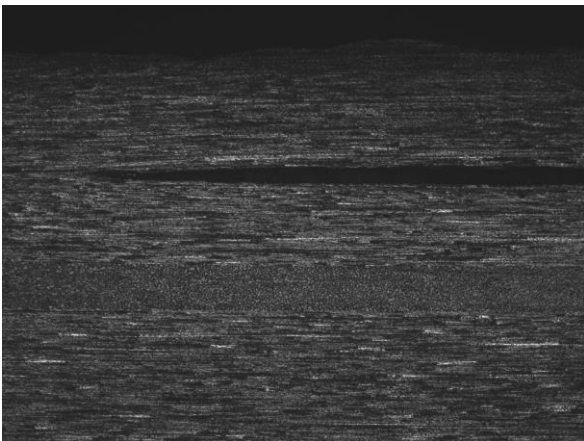
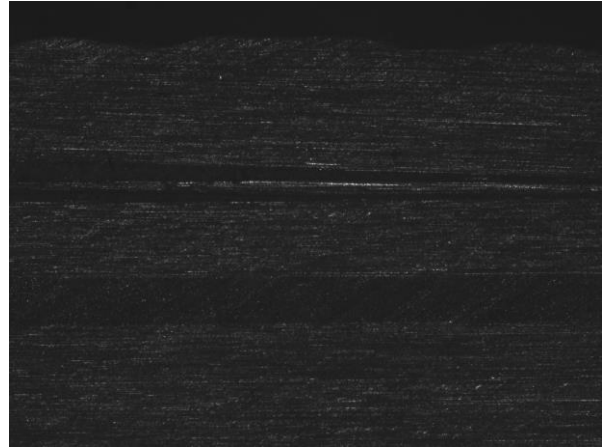


Figura 4.17 Gran hueco en la probeta 30 d.

Por último, aunque menos relevante, cabe destacar la aparición de una fibra de mayor tamaño hueca y rellena de matriz tal y como se muestra en la Figura 4.18.

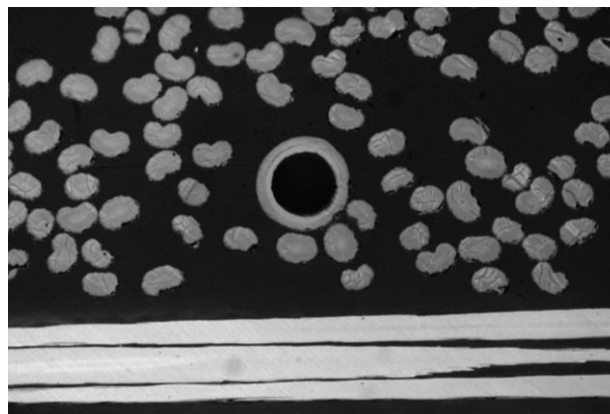


Figura 4.18 Aparición de una fibra circular en la probeta 20 c.

5 ESTUDIO DE LA APARICIÓN Y PROGRESIÓN DEL PRIMER DAÑO

El objetivo de este apartado es ensayar las probetas pulidas e ir observando en el microscopio su capa a 90, con la intención de encontrar la carga y la deformación a la que aparece el primer daño. Además, una vez encontrado este primer daño, se irá aumentando gradualmente la carga para observar su progresión.

Tras el proceso de lijado y pulido de las probetas, el siguiente paso antes de ensayarlas será realizar las medidas del ancho y espesor de cada una. Estas medidas se obtendrán de igual forma que las realizadas en los ensayos de rotura, como media aritmética de 3 medidas tomadas. Los resultados se pueden observar en las Tablas 5.1 y 5.2.

Tabla 5.1 Medidas de probetas de 20 gsm ensayadas a tracción.

Probeta	Espesor (mm)	Ancho (mm)	Longitud (mm)	Área (mm ²)
20 a	1.92	24.377	50	46.804
20 b	1.93	24.077	50	46.469
20 c	1.91	24.093	50	46.018
20 d	1.92	24.397	50	46.842
20 j	1.93	24.347	50	46.990

Tabla 5.2 Medidas de probetas de 30 gsm ensayadas a tracción.

Probeta	Espesor (mm)	Ancho (mm)	Longitud (mm)	Área (mm ²)
30 b	2.14	24.483	50	52.394
30 f	2.13	24.721	50	52.656
30 g	2.14	23.993	50	51.345
30 h	2.13	23.893	50	50.892
30 i	2.12	24.507	50	51.955

Una vez tomadas las medidas, procedemos a realizar los ensayos de tracción y anotar los resultados obtenidos. Para el cálculo del Módulo de Elasticidad se va a tener en cuenta que los laminados presentan un comportamiento elástico lineal hasta la rotura y por tanto su valor vendrá dado por la pendiente de la curva $\sigma - \varepsilon$:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad \text{donde} \quad \sigma = \frac{F}{A}$$

Como se puede observar en la ecuación anterior, el Módulo de Elasticidad se puede obtener con los datos obtenidos de carga y deformación. Para poder obtener los datos correspondientes a la deformación en cada instante a partir de los datos registrados por el extensómetro hay que aplicar la siguiente fórmula:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

donde ΔL es el alargamiento registrado por las patas del extensómetro en mm y L_0 es la apertura inicial del extensómetro, que en nuestro caso es 50 mm. Si el valor obtenido se multiplica por 100, se obtiene el valor de la deformación en tanto por ciento.

Habría que resaltar que, tanto el Módulo de Elasticidad, como la carga a rotura que se van a obtener, son aparentes del laminado, pues no se trata de obtener las propiedades de un material en sí, si no del laminado que hemos fabricado. A continuación, se va a mostrar para cada panel, la evolución de la carga aplicada a tracción en cada probeta frente a la apertura del extensómetro, la carga de rotura y el módulo de Young calculado:

Panel 20 gsm:

En la Figura 5.1 se representan los datos obtenidos tras ensayar las probetas restantes del panel fabricado con el material de 20 gsm hasta alcanzar las 3 toneladas de carga. En el eje vertical se representa la carga a la que es sometida la probeta (en N) y en el eje horizontal el alargamiento experimentado por el extensómetro que había colocado en la probeta (en mm).

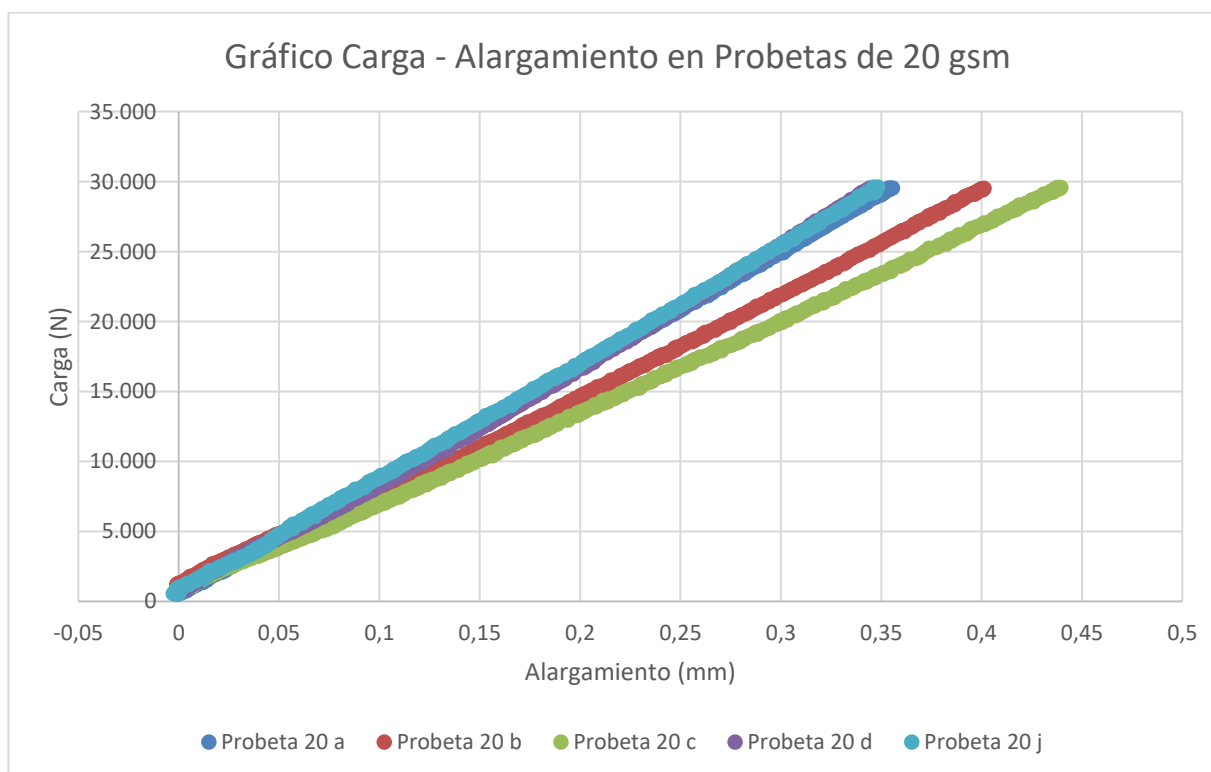


Figura 5.1 Gráfico de la carga frente al alargamiento del extensómetro en probetas de 20 gsm.

Habría que destacar que observando la Figura 5.1 se confirma el carácter lineal de la relación carga – deformación que se debe al comportamiento elástico lineal que presentan los laminados hasta su carga máxima de rotura.

En la Tabla 5.3 se registran los datos obtenidos de la carga a rotura y el módulo de Young en cada probeta. Además, al igual que se hizo con las probetas ensayadas a rotura, también se ha calculado el valor medio, la desviación típica y el coeficiente de variación de cada uno de los resultados obtenidos. Para el cálculo del módulo de Young se he hecho uso de las fórmulas mencionadas anteriormente, utilizando como intervalo: desde el instante en que el extensómetro marcaba 0 mm, con su carga asociada, hasta el instante en que la carga llegaba a las 3 toneladas, con su alargamiento del extensómetro asociado.

Tabla 5.3 Carga a rotura y Módulo de Young de las probetas del material de 20 gsm.

Panel de 20 gsm	F_R (N)	σ_R (MPa)	Módulo de Young (GPa)
20 a	51414,21	1098,504	87,513
20 b	53719,56	1156,040	75,646
20 c	46234,53	1004,713	70,780
20 d	58506,84	1249,019	89,242
20 j	53072,1	1129,441	87,887
Valor Medio	52589,448	1127,543	82,214
Desviación Típica	2212,06636	44,372	4,210
Coef. De Variación	4,206293172	3,935	5,120

Analizando los resultados obtenidos tanto en la gráfica de la Figura 5.1 como los datos de la Tabla 5.3 observamos que la desviación típica de la carga de rotura es pequeña, y parecida a la obtenida en los ensayos a rotura, aunque sí que se observa una pequeña diferencia respecto a la media de la fuerza de rotura obtenida en dichos ensayos. Respecto al módulo de Young, la desviación típica no es excesivamente grande, pero sí lo es el coeficiente de variación. Estas variaciones serían aún menores si no fuera porque las probetas 20 c y 20 d, aunque comienzan con la misma pendiente que el resto, a partir de los 5000 N se desvían levemente respecto a dicha pendiente, tal y como se puede observar en la Figura 5.1.

Panel 30 gsm:

En la Figura 5.2 se representan ahora los datos obtenidos en cada probeta para los ensayos a tracción hasta alcanzar las 3 toneladas de carga para las probetas restantes de los paneles fabricados con el material de 30 gsm.

En esta ocasión sí que se aprecia a simple vista la similitud entre las pendientes de las rectas de datos obtenidas de los ensayos en las probetas del material de 30 gsm. Esto se traducirá en módulos de Young mucho más parecidos, como se verá a continuación en la Tabla 5.4.

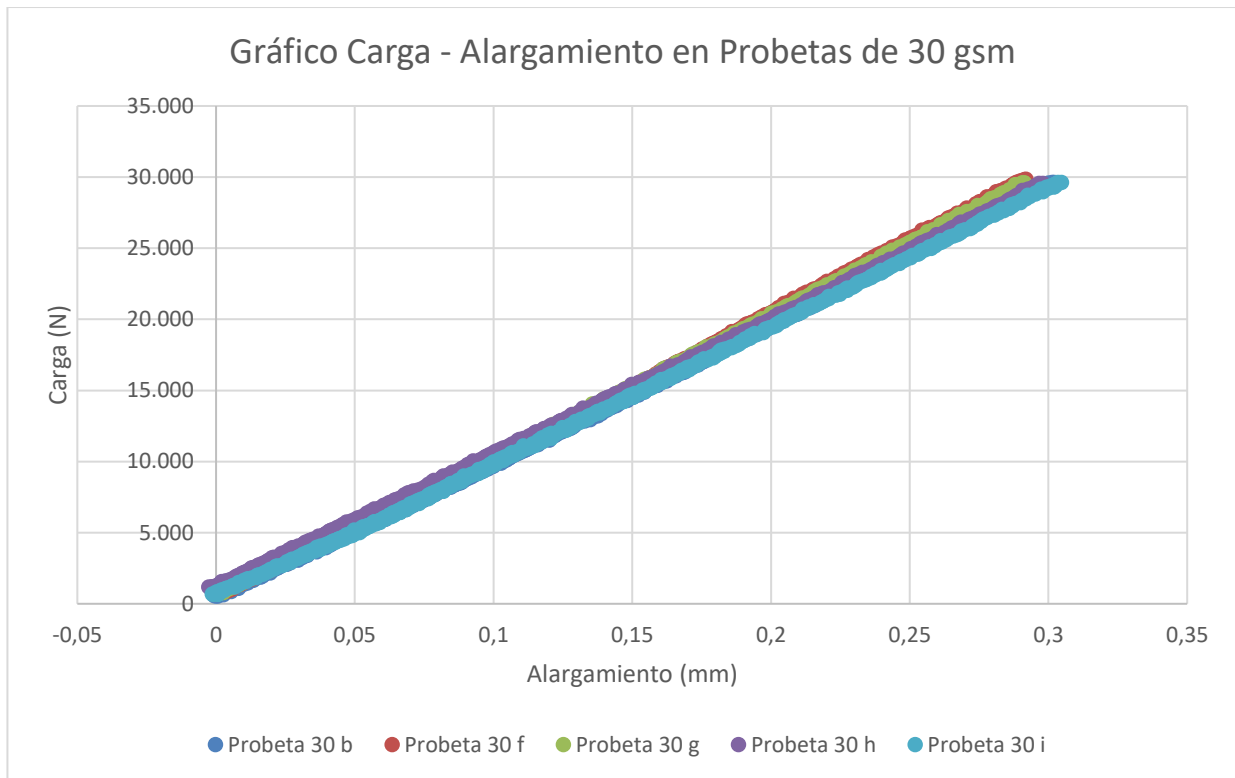


Figura 5.2 Gráfico de la Carga frente al Alargamiento del extensómetro en probetas de 30 gsm.

En la Tabla 5.4 se registran de nuevo los datos obtenidos de la carga a rotura y el módulo de Young calculado para cada probeta, pero ahora del panel de 30 gsm. Al igual que se hizo anteriormente, se calcula la media, desviación típica y coeficiente de variación de los resultados.

Tabla 5.4 Carga a rotura y Módulo de Young de las probetas del material de 30 gsm.

Panel de 30 gsm	F_R (N)	σ_R (MPa)	Módulo de Young (GPa)
30 b	59075,82	1127,538	91,621
30 f	65256,12	1239,298	95,182
30 g	66188,07	1289,085	96,353
30 h	61489,08	1208,225	95,100
30 i	55524,6	1068,709	91,343
Valor Medio	61506,738	1186,571	93,920
Desviación Típica	2203,241701	44,112	1,141
Coef. De Variación	3,58211437	3,718	1,215

Analizando ahora los resultados obtenidos tanto en la gráfica de la Figura 5.2 y los datos de la Tabla 5.4 observamos que la desviación típica de la carga de rotura es del mismo orden que la correspondiente a las probetas del panel del material de 20 gsm. Respecto al módulo de Young, la desviación típica es muy pequeña,

ya que tal y como se puede observar en la Figura 5.2., las pendientes son muy similares entre ellas.

5.1 Estudio del daño en las probetas del material de 20 gsm

Una vez estudiadas las propiedades aparentes de estas probetas, se muestra ahora el procedimiento seguido y los datos obtenidos de cada descarga en cada probeta hasta la rotura, junto con las imágenes de las grietas encontradas y su evolución. Sin embargo, los datos de las deformaciones proporcionadas por el extensómetro sólo se muestran hasta alcanzar los 3000 kg, a partir de los cuales se retira el extensómetro. Por tanto, en todas las tablas mostradas a continuación habrá una franja azul oscuro en la columna de la deformación, que se corresponderá con las deformaciones calculadas a través del módulo de Young calculado anteriormente. Además, también se mostrará una fila roja, que indicará la carga a la que se observó el primer daño al que posteriormente se le ha hecho el seguimiento para ver cómo progresa dicho daño.

En primer lugar, se van a estudiar las probetas correspondientes al material de 20 gsm. A continuación, se muestran los datos y las imágenes anteriormente mencionados, correspondientes a cada probeta.

5.1.1 Probeta 20 a

La primera probeta en ser estudiada es la probeta 20 a. En la Tabla 5.5 se enumeran el número de descargas realizadas, las fuerzas y cargas a las que se han realizado dichas descargas y las deformaciones asociadas.

Tabla 5.5 Datos obtenidos de los ensayos de la probeta 20 a.

Ensayo	Fuerza máx (N)	Tensión máx (Mpa)	Deformación (%)
1	16745,670	357,784	0,37440
2	18207,360	389,014	0,46300
3	19747,530	421,921	0,44960
4	21846,870	466,775	0,49660
5	24711,390	527,978	0,57580
6	29547,720	631,310	0,70740
7	34442,910	735,899	0,72220
8	39367,530	841,118	0,83904
9	44321,580	946,965	0,94462
10	49236,390	1051,973	1,04937
11	51414,210	1098,504	1,09579

Tal y como se había mencionado anteriormente, la fila roja indica la aparición del primer fallo, por lo que éste apareció para una carga aproximada de 17000 N.

En la Figura 5.3 se muestra la evolución del fallo, a través de las capturas hechas al microscopio a medida que se iba aumentando la carga. Estas capturas se muestran sobre una gráfica obtenida con Matlab que relaciona la carga con la deformación del extensómetro haciendo uso del módulo de Young obtenido anteriormente como pendiente de la recta. Además, destacar que a partir de ahora se marcará en este tipo de Figura de cada probeta, una fibra en rojo para ubicar la zona en que apareció el primer fallo.

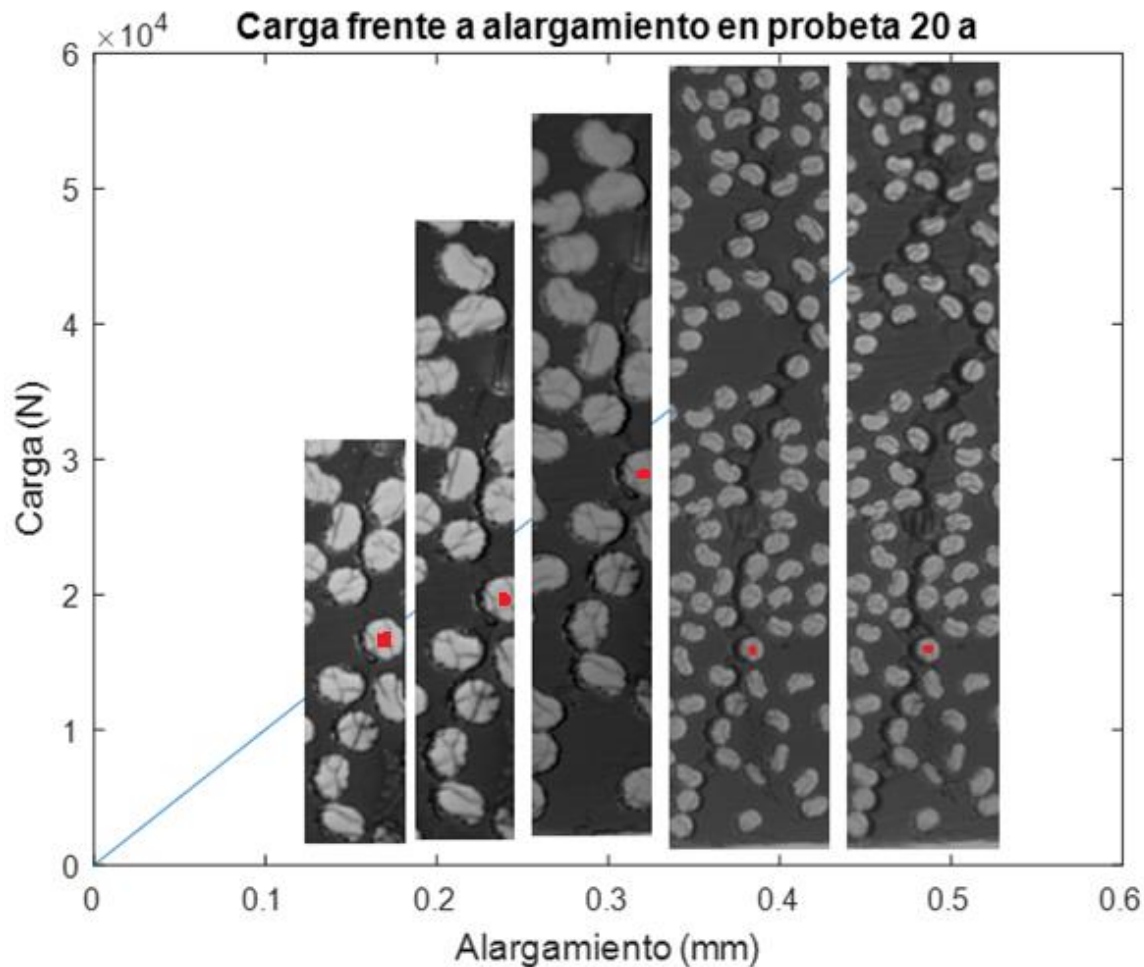


Figura 5.3 Gráfico Carga - Alargamiento junto con la evolución de la primera grieta en la probeta 20 a.

A continuación, desde la Figura 5.4 a la 5.9 se muestran todas las micrografías tomadas en cada ensayo a modo de facilitar el entendimiento de la forma en la que creció el fallo.

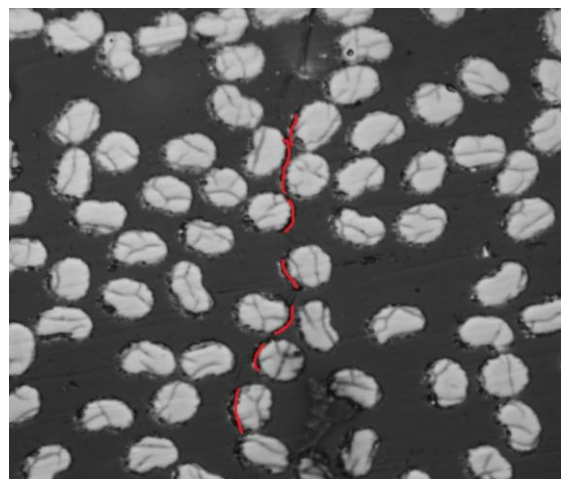
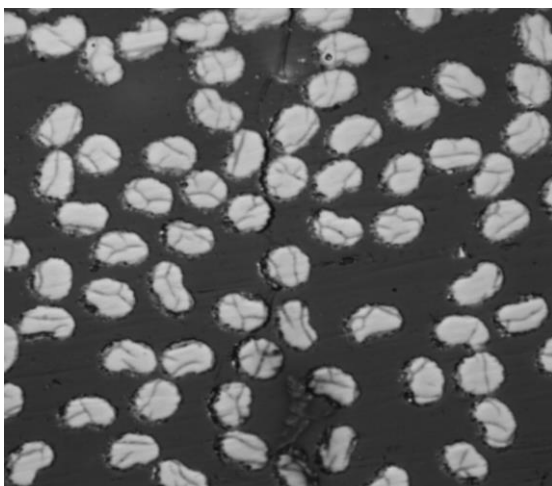


Figura 5.4 Primer fallo a 17000 N (izquierda) con los despegues en rojo (derecha) en la probeta 20 a.

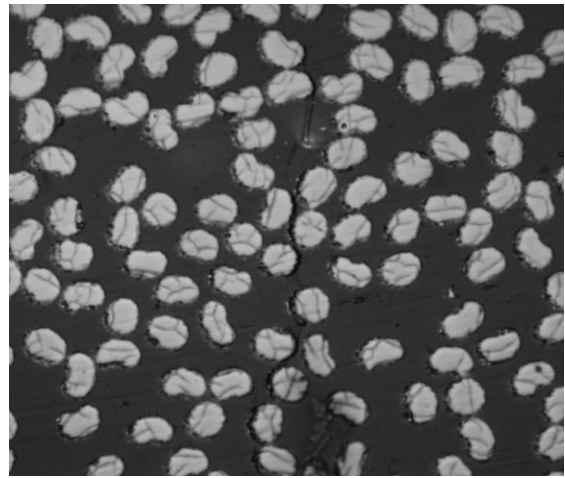
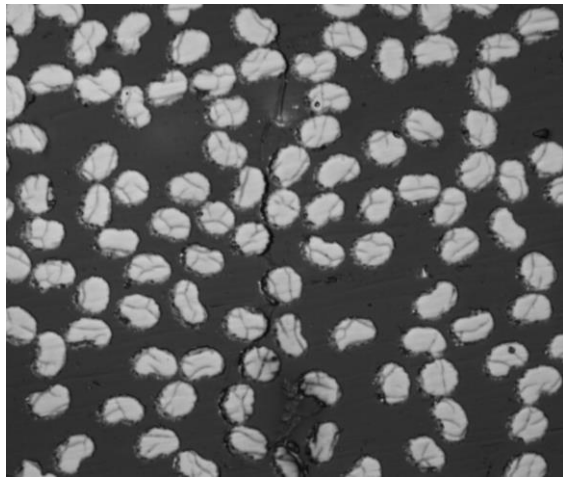


Figura 5.5 Estado de la grieta a 18500 N (izquierda) y 20000 N (derecha) en la probeta 20 a.

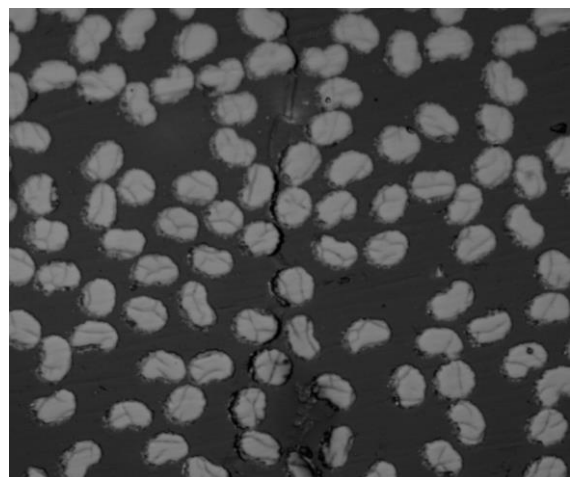
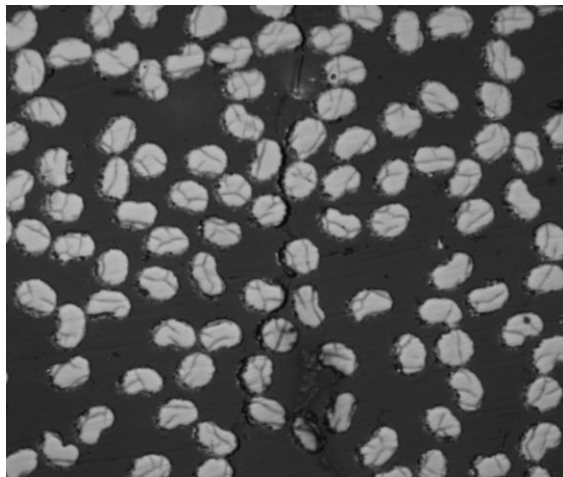


Figura 5.6 Estado de la grieta a 22500 N (izquierda) y 25000 N (derecha) en la probeta 20 a.

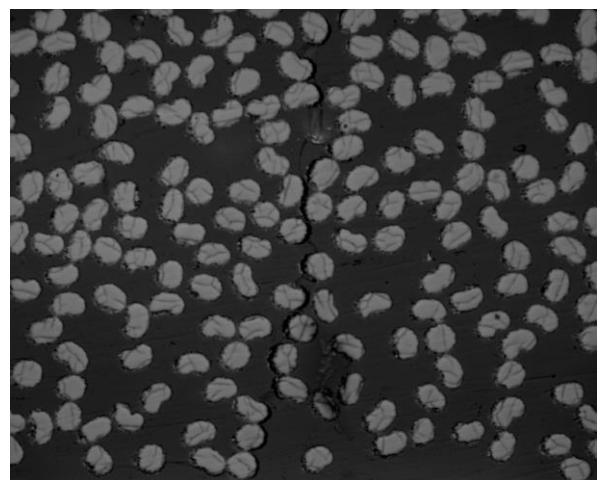
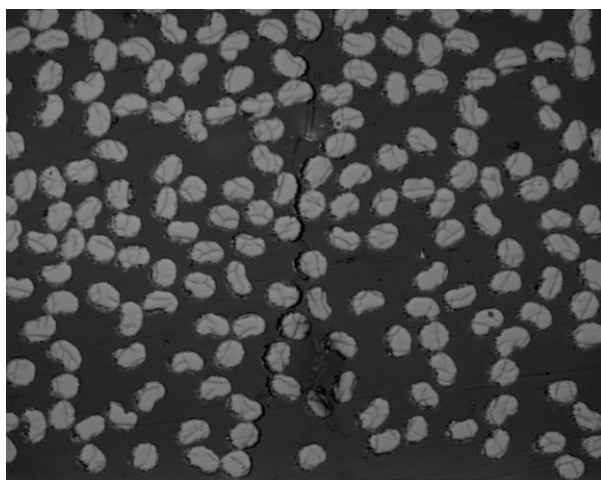


Figura 5.7 Estado de la grieta a 30000 N (izquierda) y 35000 N (derecha) en la probeta 20 a.

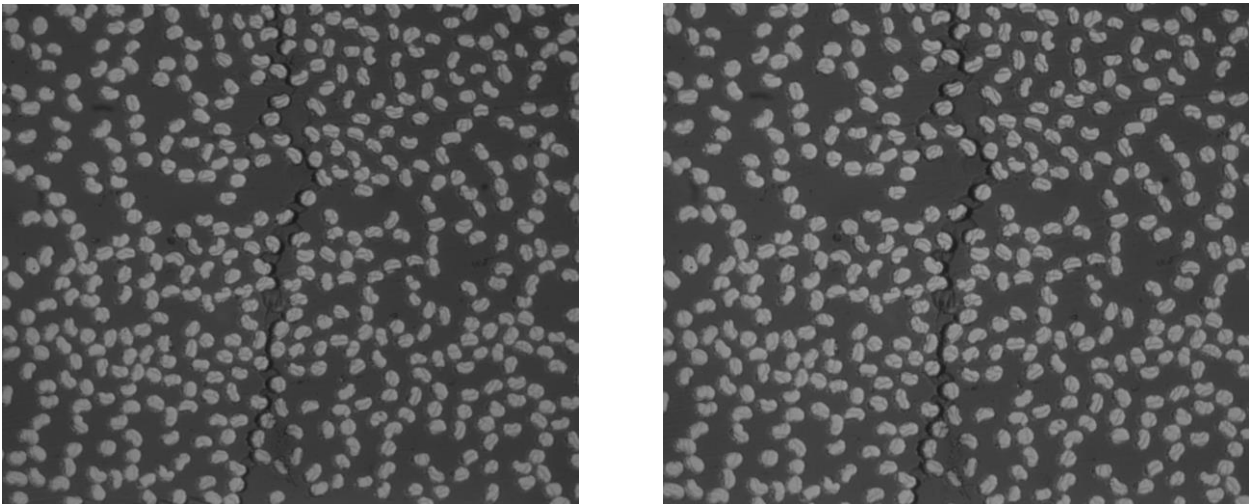


Figura 5.8 Estado de la grieta a 40000 N (izquierda) y 45000 N (derecha) en la probeta 20 a.

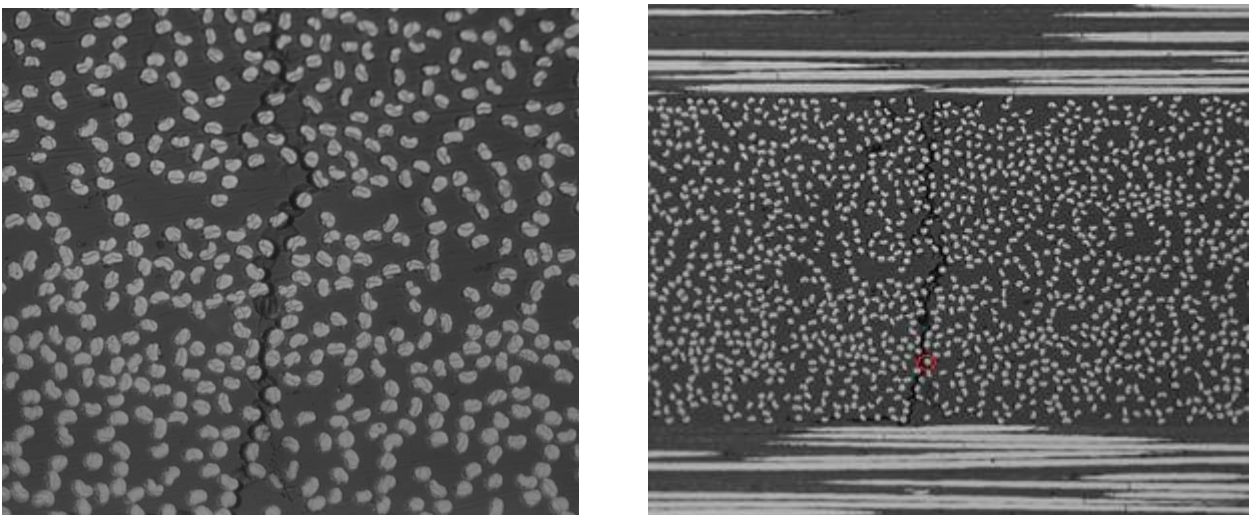


Figura 5.9 Estado de la grieta a 50000 N en la probeta 20 a a distintos aumentos (x500 izq. y x100 der).

En la imagen de la derecha de la Figura 5.9 se ha redondeado la fibra que se marcó en la Figura 5.3, a modo de identificar la zona en que apareció el primer fallo, lo que se también se repetirá para futuras probetas. Por otro lado, se observa cómo el primer fallo encontrado finalmente se convirtió en una gran grieta que atravesaba transversalmente toda la capa de 90. Además, se puede ver que comenzaron a aparecer daños asociados a una futura delaminación, pues la grieta se propaga longitudinalmente por la interfaz entre la capa de 90 y las de 0.

5.1.2 Probeta 20 b

A continuación, se muestran los datos obtenidos de los ensayos de la probeta 20 b. En la Tabla 5.6 se enumeran las descargas realizadas, las fuerzas y cargas a las que se han realizado dichas descargas y las deformaciones asociadas.

Tabla 5.6 Datos obtenidos de los ensayos de la probeta 20 b.

Ensayo	Fuerza máx (N)	Tensión máx (Mpa)	Deformación (%)
--------	----------------	-------------------	-----------------

1	15735,240	338,621	0,32760
2	17716,860	381,265	0,41340
3	19708,290	424,120	0,41880
4	24652,530	530,520	0,64020
5	29508,480	635,020	0,80260
6	34501,770	742,475	0,98152
7	39446,010	848,874	1,12217
8	44400,060	955,485	1,26311
9	49197,150	1058,718	1,39958
10	53719,560	1156,040	1,52823

En la Figura 5.10 se muestra de nuevo la evolución del fallo que ha aparecido a 2500 N, sobre una gráfica obtenida con Matlab que relaciona la carga con la deformación del extensómetro haciendo uso del módulo de Young.

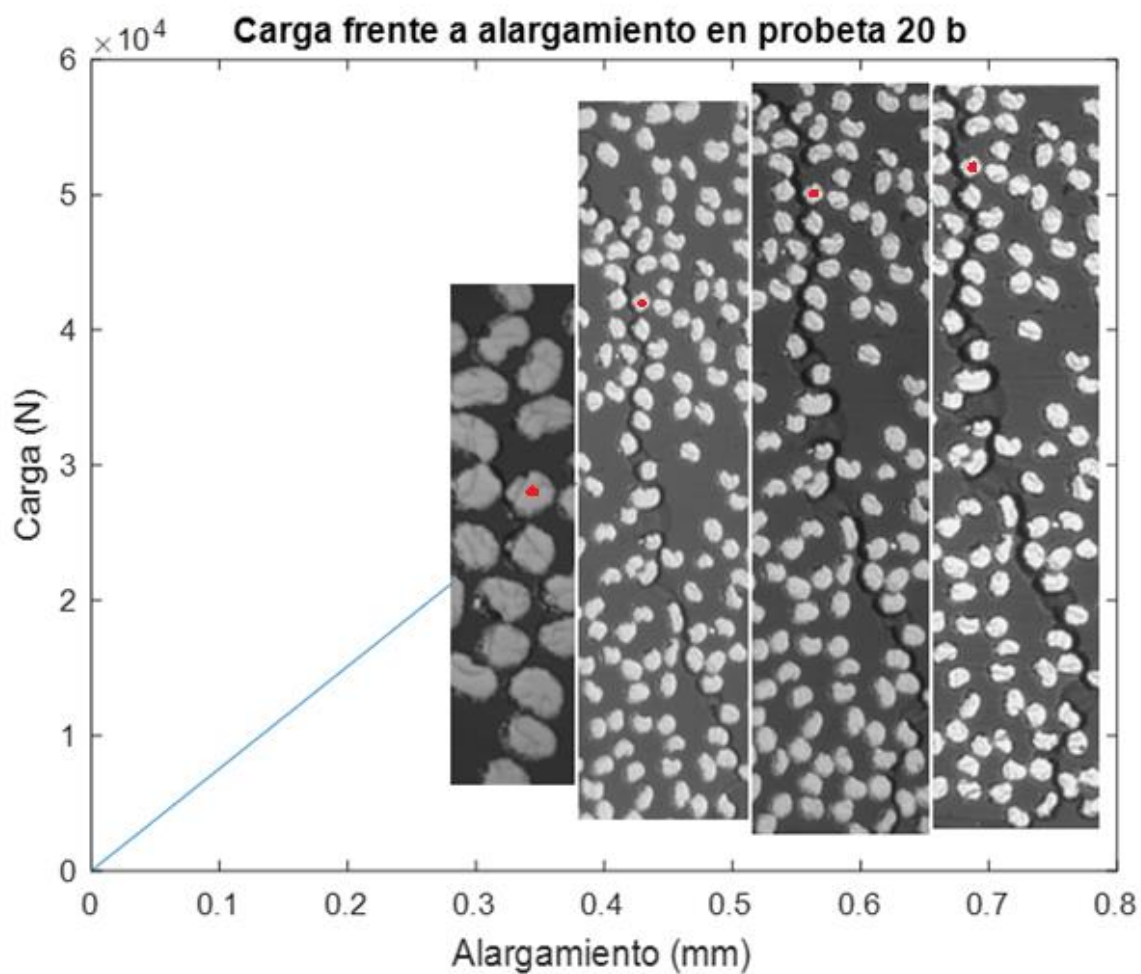


Figura 5.10 Gráfico Carga - Alargamiento junto con la evolución de la primera grieta en la probeta 20 b.

Desde la Figura 5.11 a la 5.14, se muestran las micrografías tomadas en cada ensayo para mostrar la forma en la que creció la grieta.

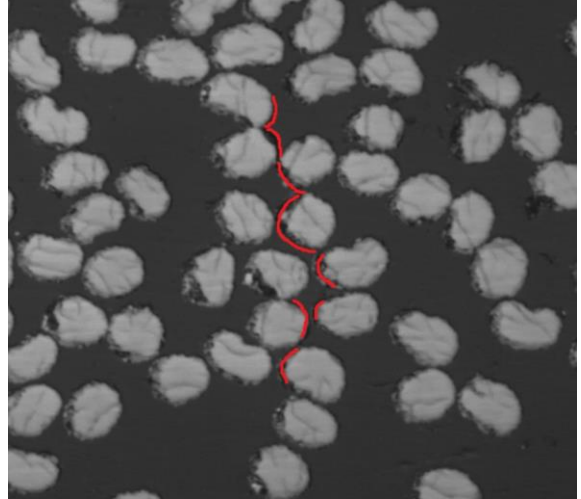
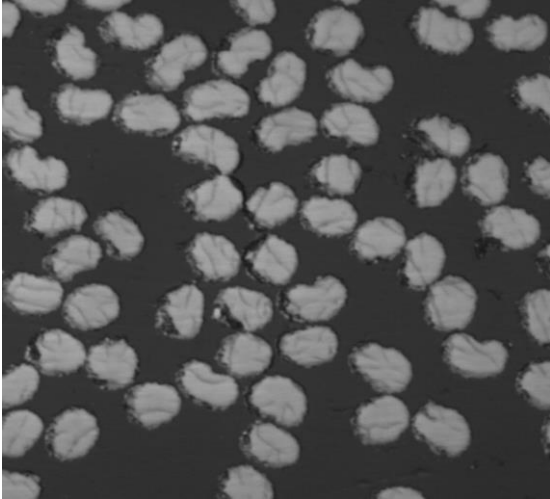


Figura 5.11 Primer fallo a 25000 N (izquierda) con los despegues en rojo (derecha) en la probeta 20 b

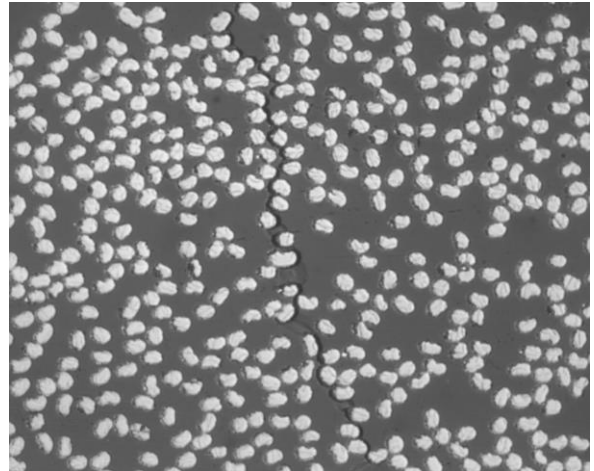
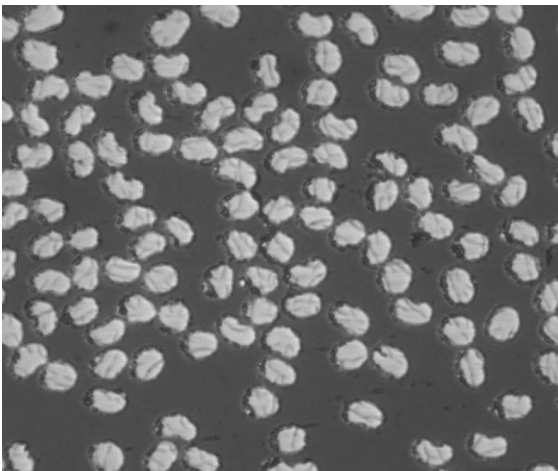


Figura 5.12 Estado de la grieta a 30000 N (izquierda) y 35000 N (derecha) en la probeta 20 b

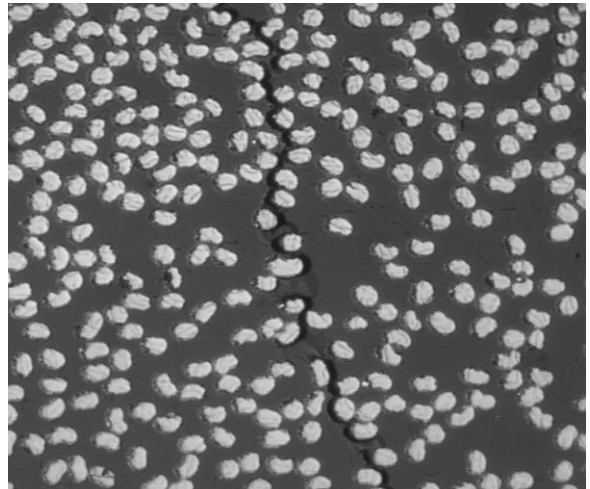
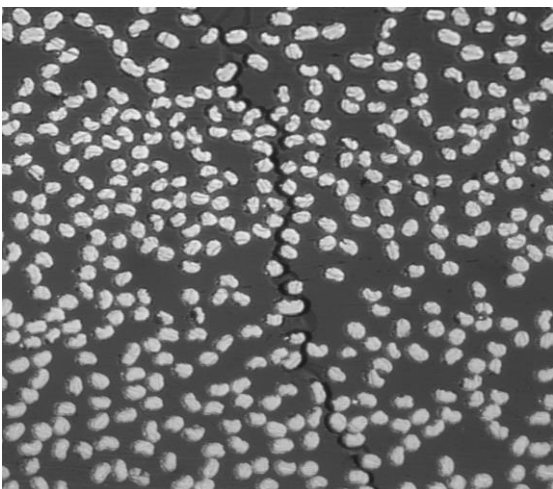


Figura 5.13 Estado de la grieta a 40000 N (izquierda) y 45000 N (derecha) en la probeta 20 b

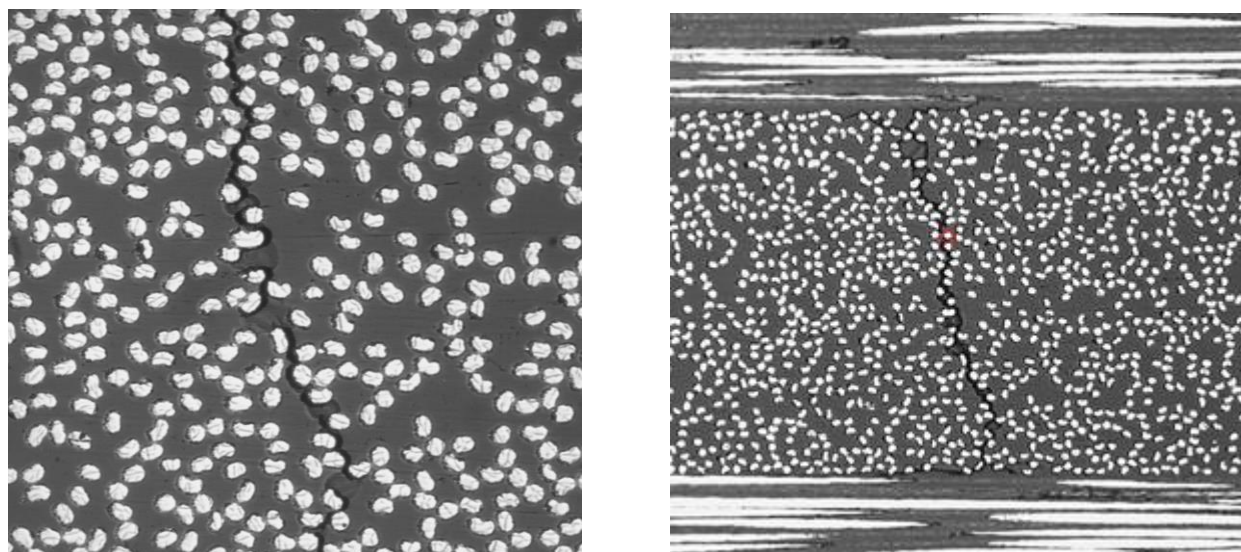


Figura 5.14 Estado de la grieta a 50000 N en la probeta 20 b a distintos aumentos (x500 izq. y x100 der).

Se observa de nuevo cómo el primer fallo, encontrado cerca de la zona media de la capa de 90, finalmente se convirtió en una gran grieta que atravesaba transversalmente toda la capa de 90. Además, se puede ver que en esta probeta también comenzó a aparecer daño asociado a una futura delaminación, pues la grieta se propaga longitudinalmente por los extremos de dicha capa de 90.

5.1.3 Probeta 20 c

En la Tabla 5.7 se enumeran el número de descargas realizadas, las fuerzas y cargas a las que se han realizado dichas descargas y las deformaciones asociadas a los ensayos de la probeta 20 c.

Tabla 5.7 Datos obtenidos de los ensayos de la probeta 20 c.

Ensayo	Fuerza máx (N)	Tensión máx (Mpa)	Deformación (%)
1	14822,910	322,114	0,43360
2	17353,890	377,114	0,43760
3	19747,530	429,130	0,58260
4	22219,650	482,851	0,55160
5	24623,100	535,080	0,74100
6	27173,700	590,506	0,63080
7	29586,960	642,948	0,87920

8	34501,770	749,751	1,05927
9	39485,250	858,046	1,21227
10	44419,680	965,275	1,36377
11	46234,530	1004,713	1,41949

En la Figura 5.15 se muestra la evolución del primer daño que finalmente apareció aproximadamente a una carga de 2000 N. En la gráfica se representa la relación de la carga con la deformación del extensómetro obtenida con Matlab.

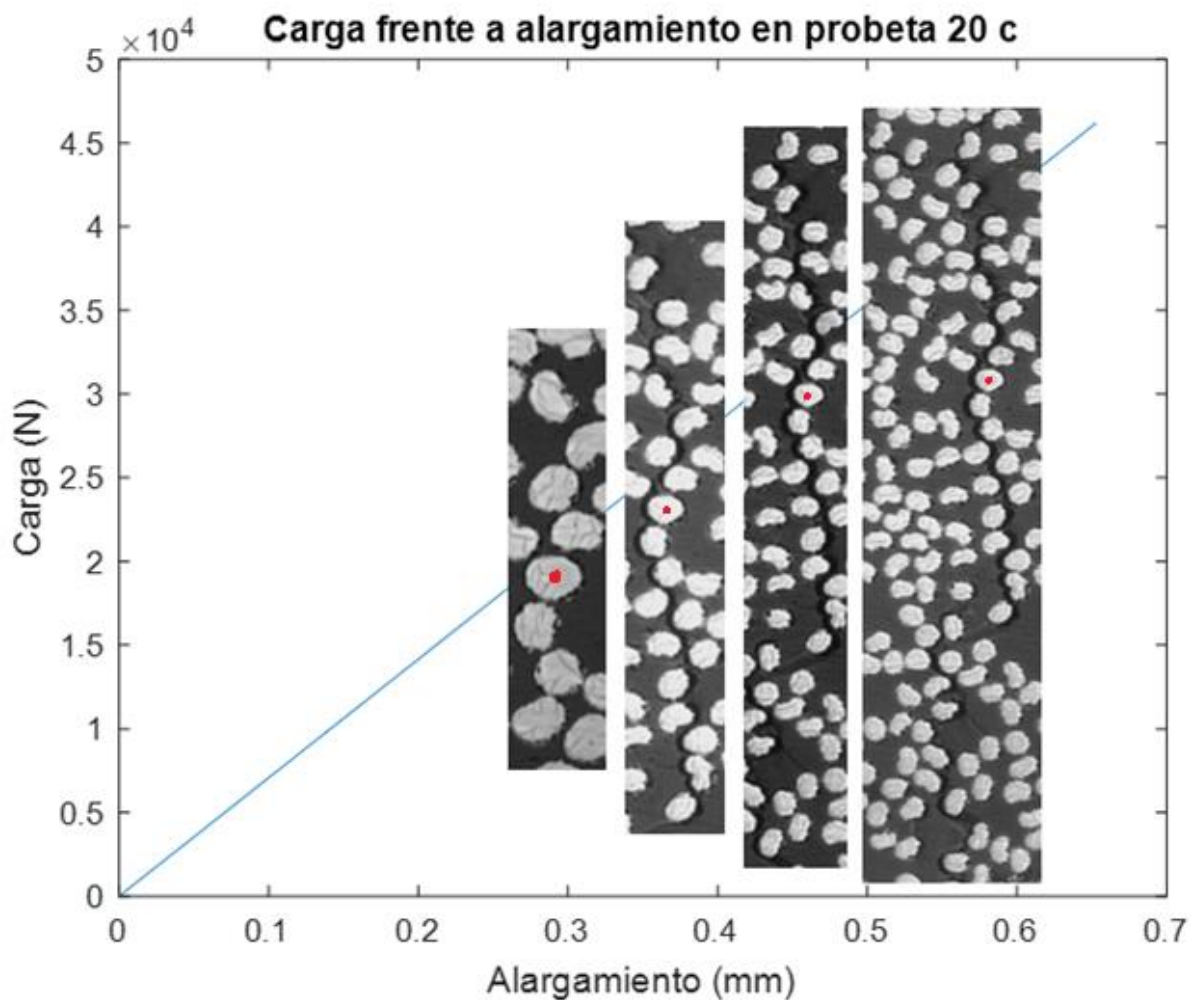


Figura 5.15 Gráfico Carga - Alargamiento junto con la evolución de la primera grieta en la probeta 20 c.

Una vez expuestos los datos de los ensayos, en las Figuras 5.16 a 5.20, se muestran las micrografías tomadas en cada descarga de la probeta para mostrar la forma en la que creció la grieta.

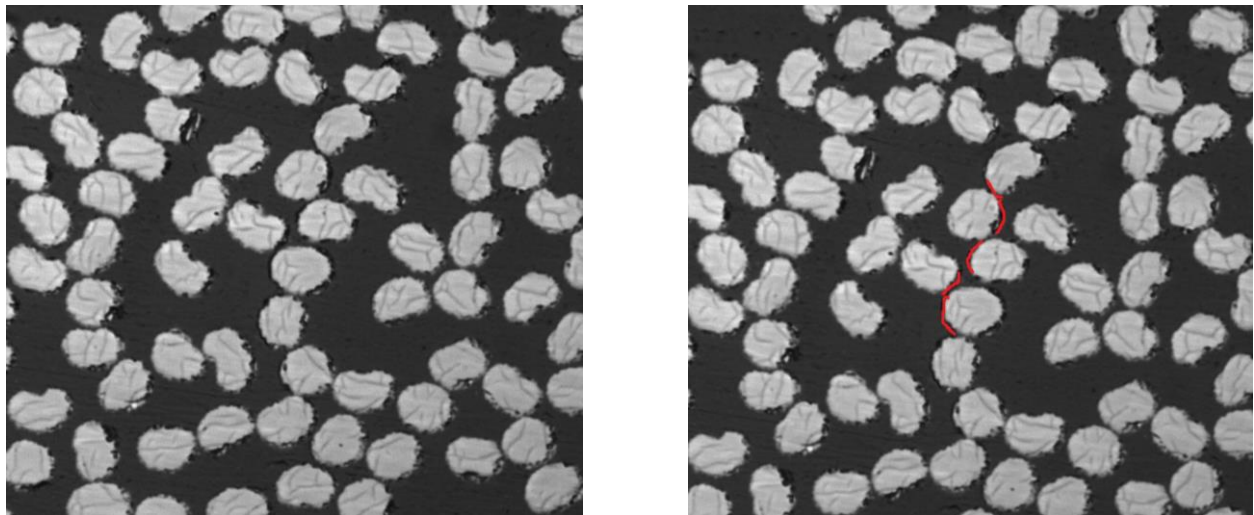


Figura 5.16 Primer fallo a 20000 N (izquierda) con los despegues en rojo (derecha) en la probeta 20 c.

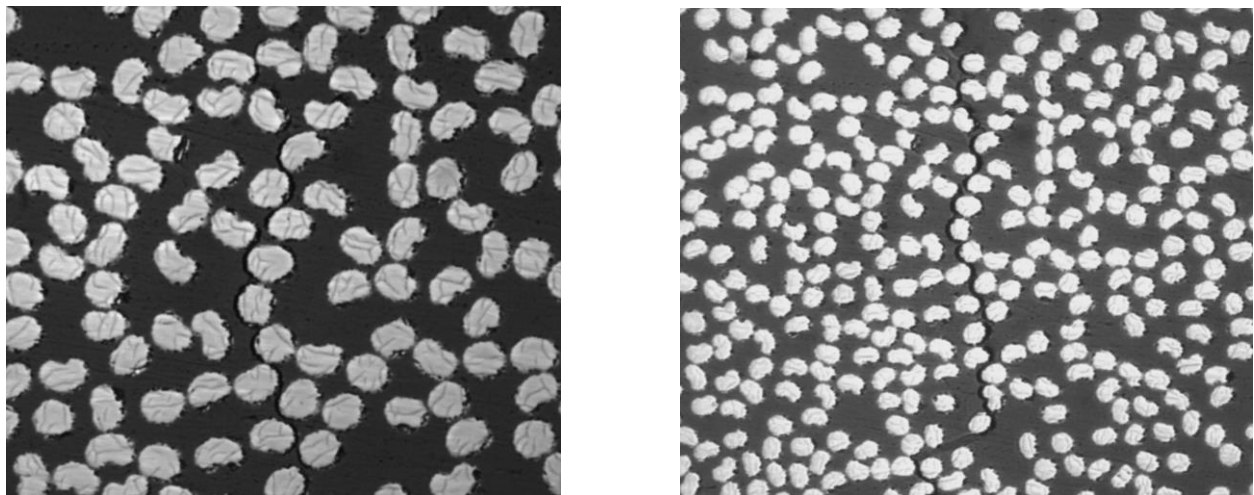


Figura 5.17 Estado de la grieta a 22500 N (izquierda) y 25000 N (derecha) en la probeta 20 c.

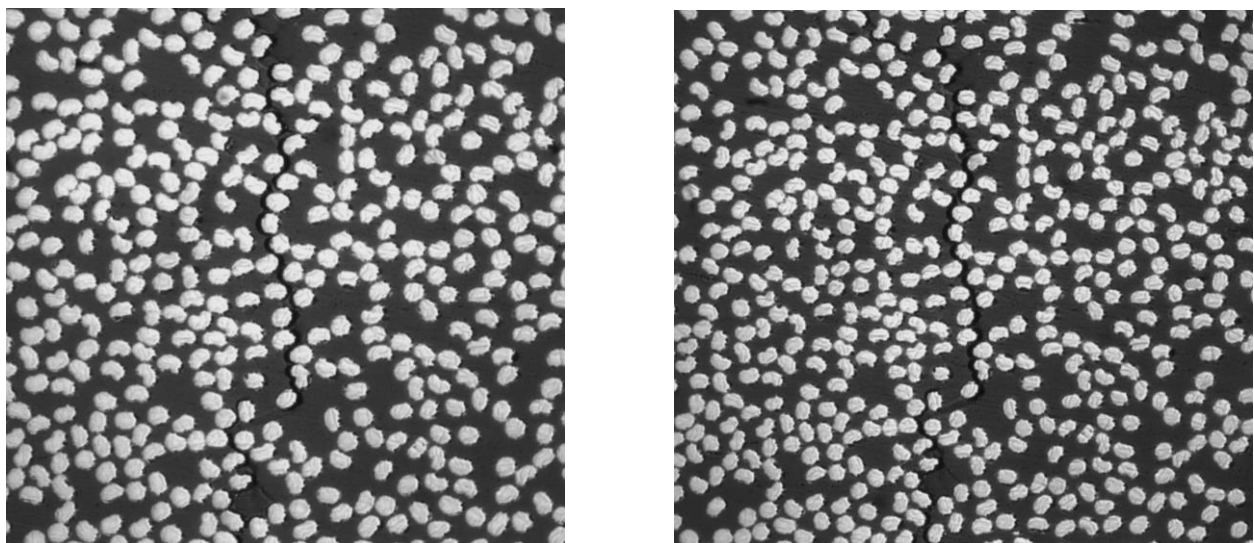


Figura 5.18 Estado de la grieta a 27500 N (izquierda) y 30000 N (derecha) en la probeta 20 c.

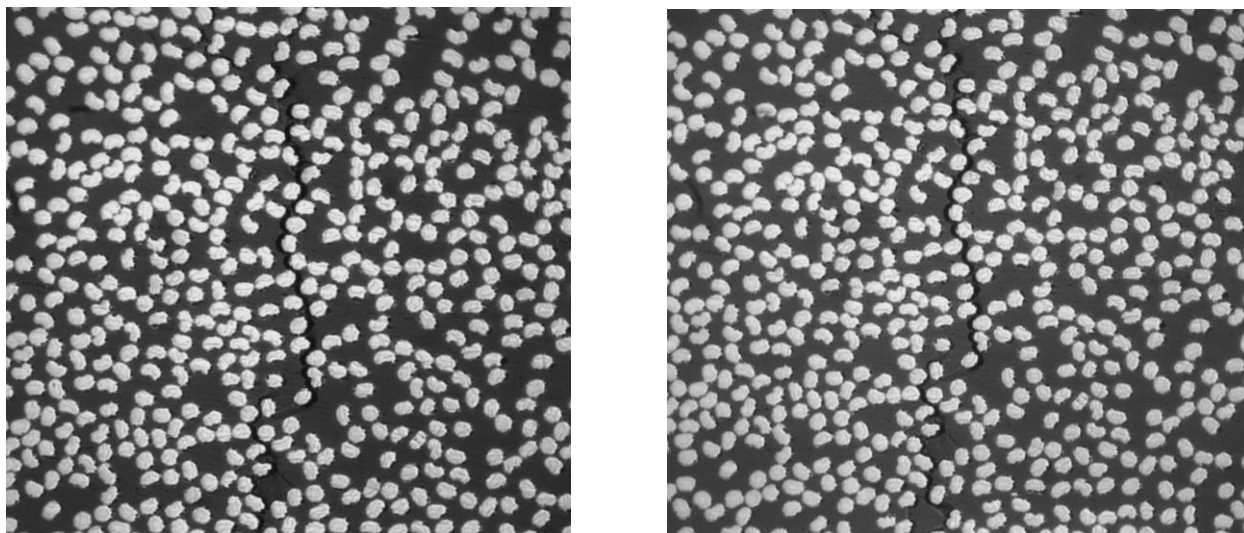


Figura 5.19 Estado de la grieta a 35000 N (izquierda) y 40000 N (derecha) en la probeta 20 c.

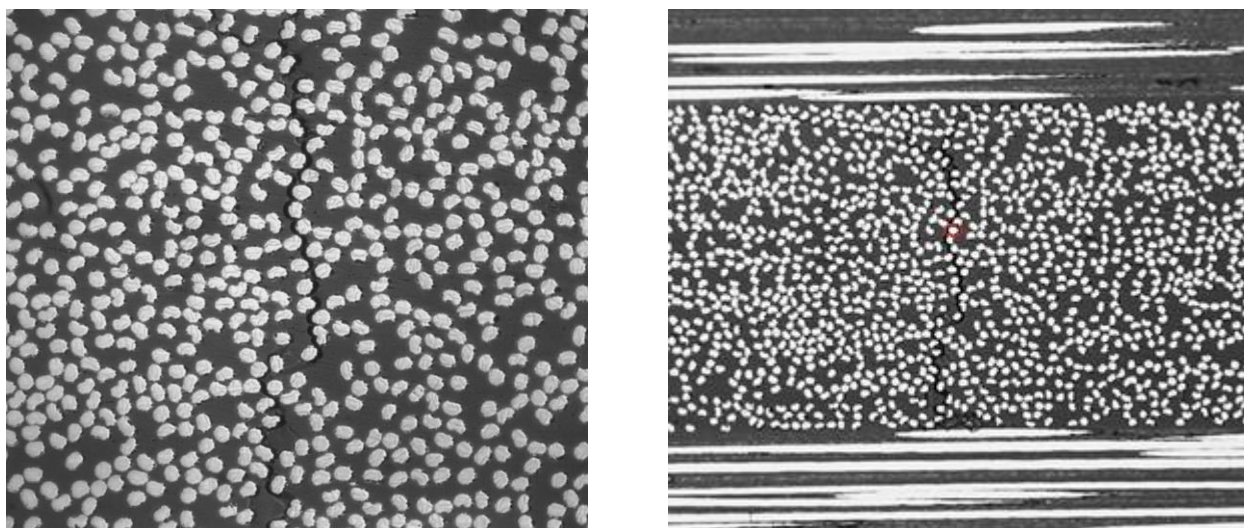


Figura 5.20 Estado de la grieta a 45000 N en la probeta 20 c a distintos aumentos (x500 izq. y x100 der).

Se observa de nuevo, cómo el primer fallo encontrado finalmente se convirtió en una gran grieta que atravesaba transversalmente toda la capa de 90 grados. En este caso no se observan indicios de delaminación.

5.1.4 Probeta 20 d

Pasamos ahora a estudiar la probeta 20 d. En la Tabla 5.8 se enumeran el número de descargas, las fuerzas y cargas a las que se han realizado dichas descargas y las deformaciones asociadas en dicha probeta.

Tabla 5.8 Datos obtenidos de los ensayos de la probeta 20 d.

Ensayo	Fuerza máx (N)	Tensión máx (Mpa)	Deformación (%)
1	7888,220	168,400	0,20540

2	8907,480	190,159	0,24960
3	9917,910	211,730	0,21880
4	10849,860	231,626	0,34760
5	11840,670	252,778	0,38120
6	12841,290	274,139	0,28460
7	13812,480	294,872	0,31820
8	14783,670	315,606	0,35160
9	15764,670	336,548	0,37040
10	16784,910	358,329	0,42960
11	17726,670	378,433	0,52620
12	18795,960	401,261	0,44700
13	19727,910	421,156	0,33560
14	21689,910	463,042	0,49400
15	24672,150	526,707	0,70600
16	27016,740	576,760	0,63480
17	29547,720	630,792	0,68860
18	34482,150	736,134	0,82488
19	39387,150	840,847	0,94221
20	44184,240	943,256	1,05697
21	49236,390	1051,111	1,17783
22	54180,630	1156,662	1,29610
23	58506,840	1249,019	1,39959

El hecho de que en esta probeta se realizaran tantos ensayos se debe a que fue una de las primeras probetas ensayadas y aún se estaba buscando la carga aproximada a la que aparecía el primer daño, empezando a cargar desde unos 8000 N.

En la Figura 5.21 se muestra la evolución del primer daño, que finalmente apareció a una carga aproximada de

25000 N, sobre la gráfica que representa la carga frente a la deformación del extensómetro obtenida con Matlab.

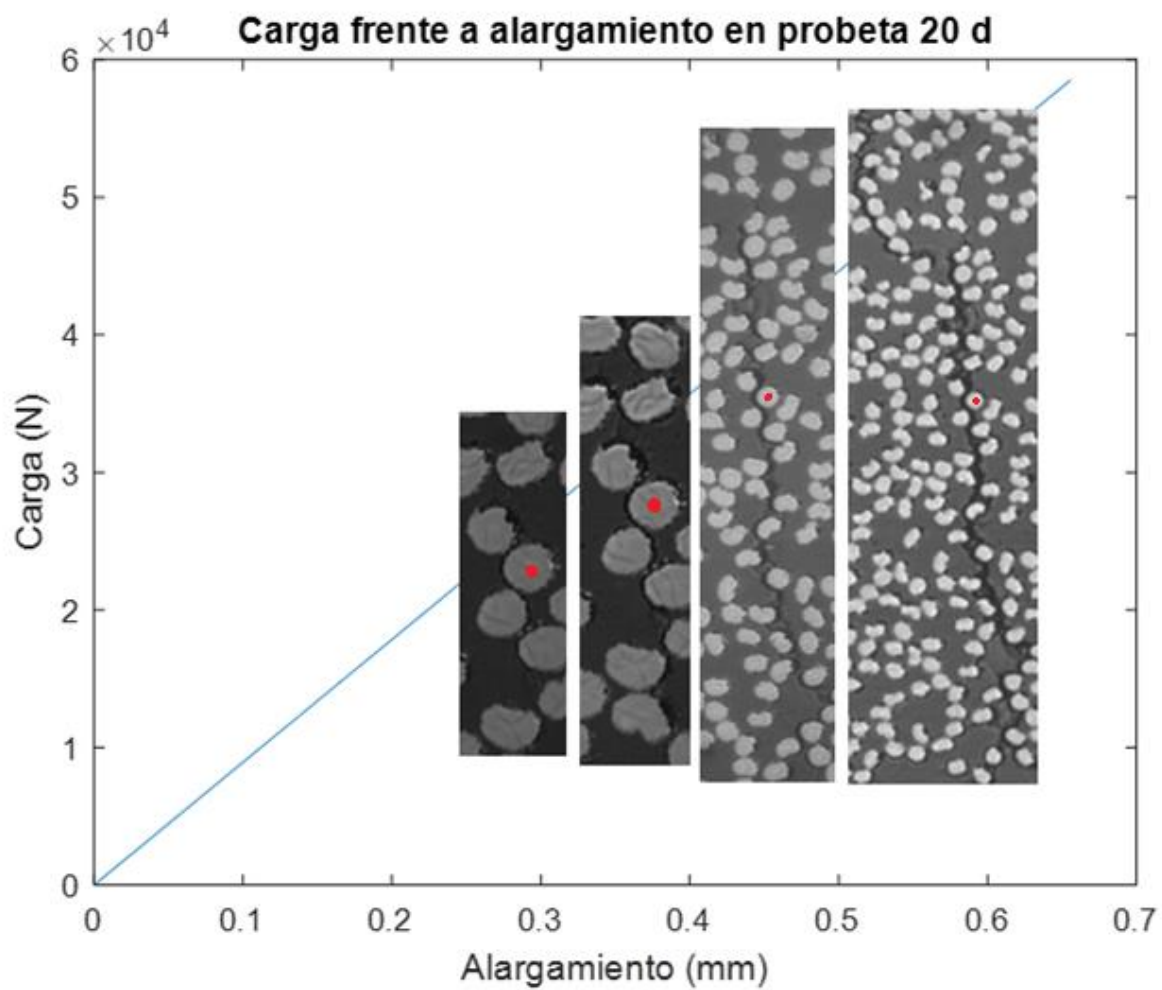


Figura 5.21 Gráfico Carga - Alargamiento junto con la evolución de la primera grieta en la probeta 20 d.

Una vez expuestos los datos de los ensayos, en las Figuras 5.22 a 5.26, se muestran las micrografías tomadas en cada ensayo para mostrar la forma en la que creció la grieta.

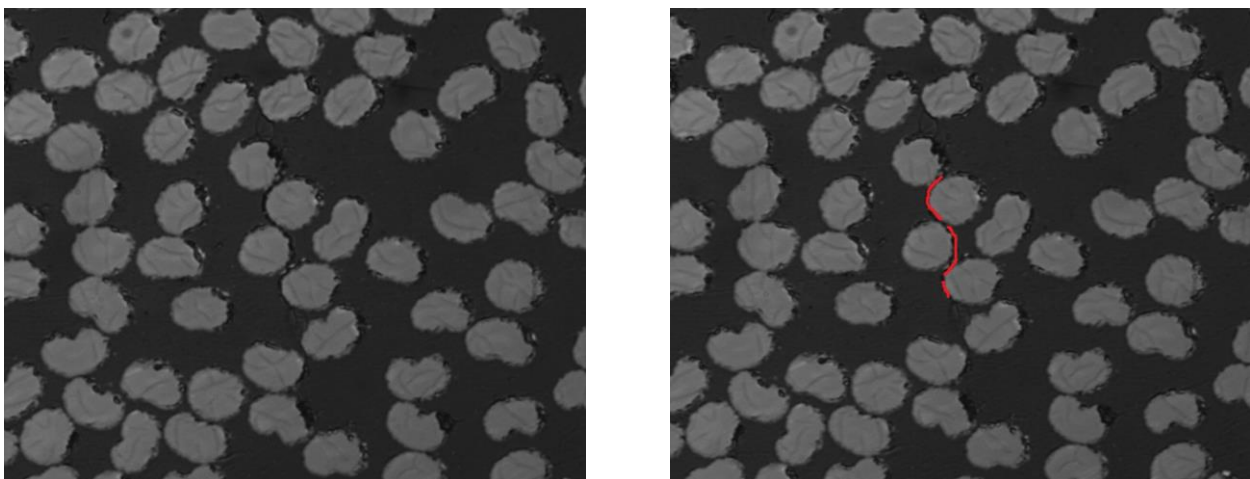


Figura 5.22 Primer fallo a 25000 N (izquierda) con los despegues en rojo (derecha) en la probeta 20 d.

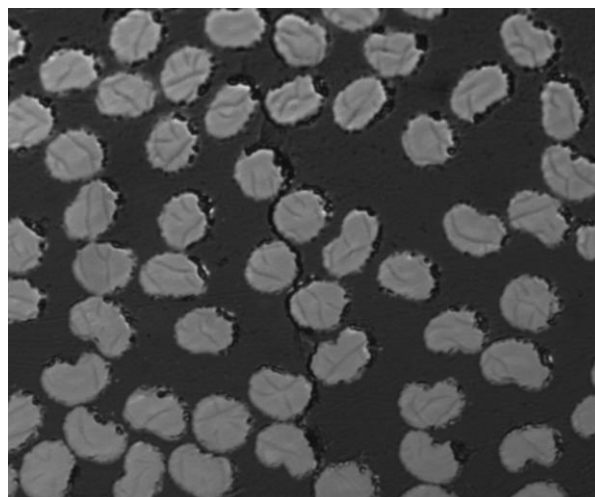
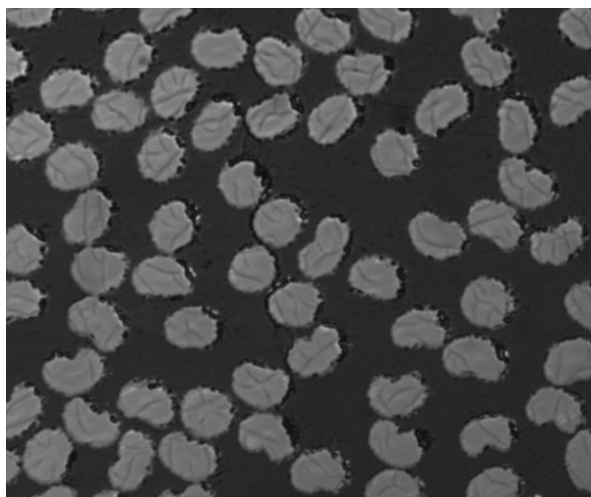


Figura 5.23 Estado de la grieta a 27500 N (izquierda) y 30000 N (derecha) en la probeta 20 d.

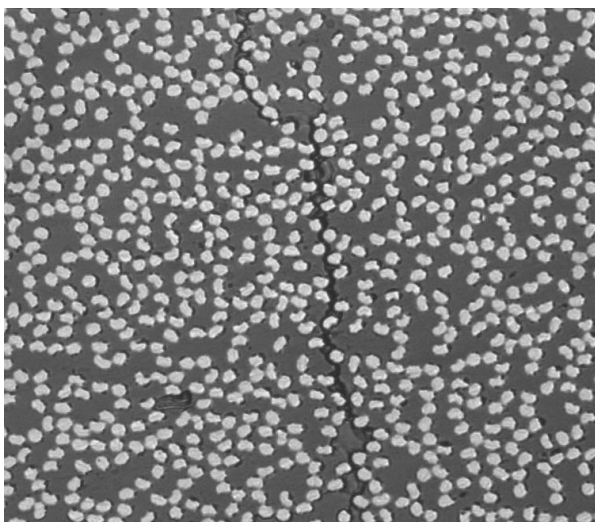
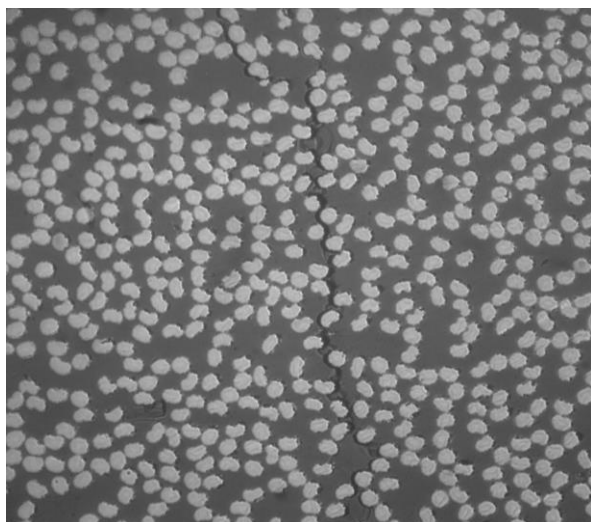


Figura 5.24 Estado de la grieta a 35000 N (izquierda) y 40000 N (derecha) en la probeta 20 d.

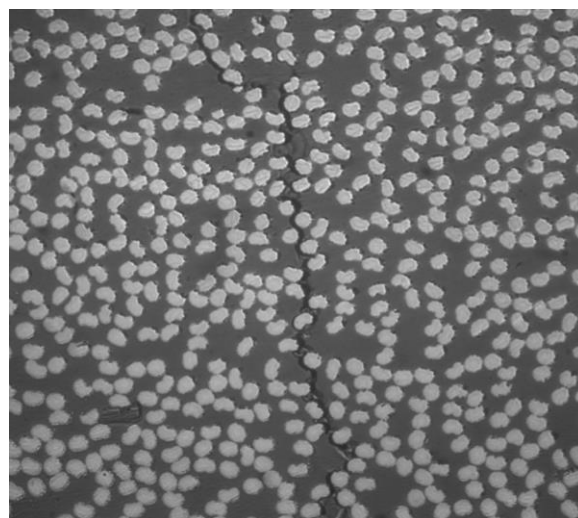
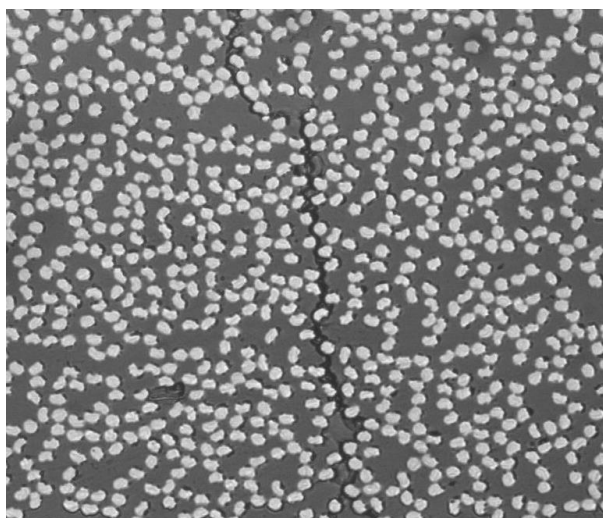


Figura 5.25 Estado de la grieta a 45000 N (izquierda) y 50000 N (derecha) en la probeta 20 d.

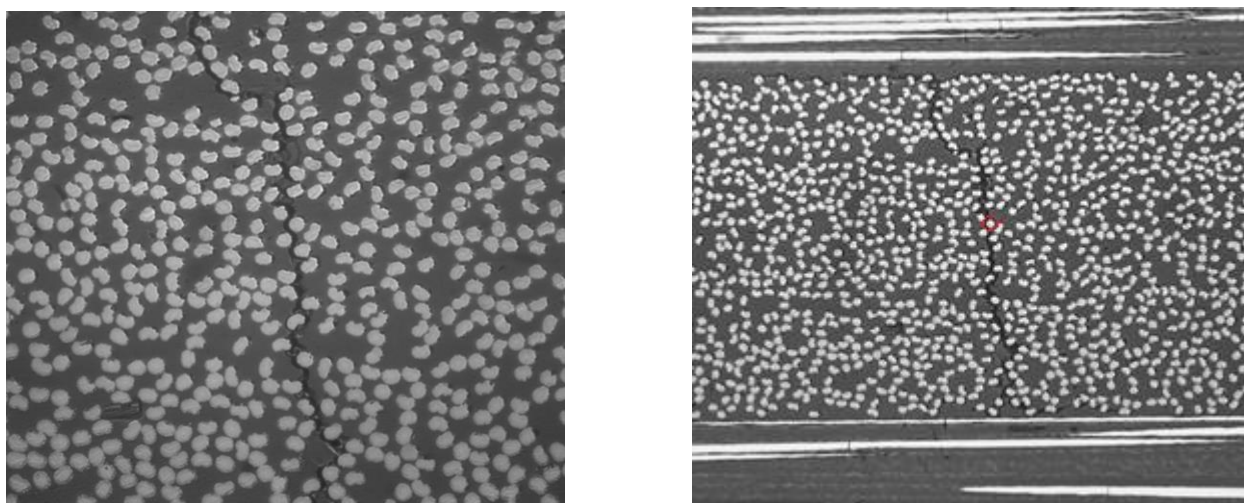


Figura 5.26 Estado de la grieta a 55000 N en la probeta 20 d a distintos aumentos (x500 izq. y x100 der).

Una vez más, el primer fallo encontrado se convirtió en una gran grieta que atravesaba transversalmente toda la capa de 90. Además, se puede ver que en esta grieta sí que aparece daño asociado a una futura delaminación.

5.1.5 Probeta 20 j

Para terminar con el panel del material de 20 gsm, ensayamos la probeta 20 j. En la Tabla 5.9 se enumeran el número de descargas, las fuerzas y cargas a las que se han realizado dichas descargas y sus deformaciones.

Tabla 5.9 Datos obtenidos de los ensayos de la probeta 20 j.

Ensayo	Fuerza máx (N)	Tensión máx (Mpa)	Deformación (%)
1	7852,900	167,120	0,18920
2	8848,620	188,310	0,22020
3	9839,430	209,395	0,26580
4	10830,240	230,481	0,24560
5	11781,810	250,732	0,28060
6	12802,050	272,444	0,31400
7	14793,480	314,824	0,34760
8	19580,760	416,703	0,04300
9	24603,480	523,593	0,63080

10	29606,580	630,065	0,69260
11	34482,150	733,823	0,83496
12	39367,530	837,790	0,95325
13	44282,340	942,384	1,07226
14	49275,630	1048,647	1,19317
15	53072,100	1129,441	1,28510

En la Figura 5.27 se muestra la evolución del primer daño, que apareció a un valor de la carga aproximada de 12000 N, sobre la gráfica se representa la relación de la carga con la deformación del extensómetro obtenida con Matlab.

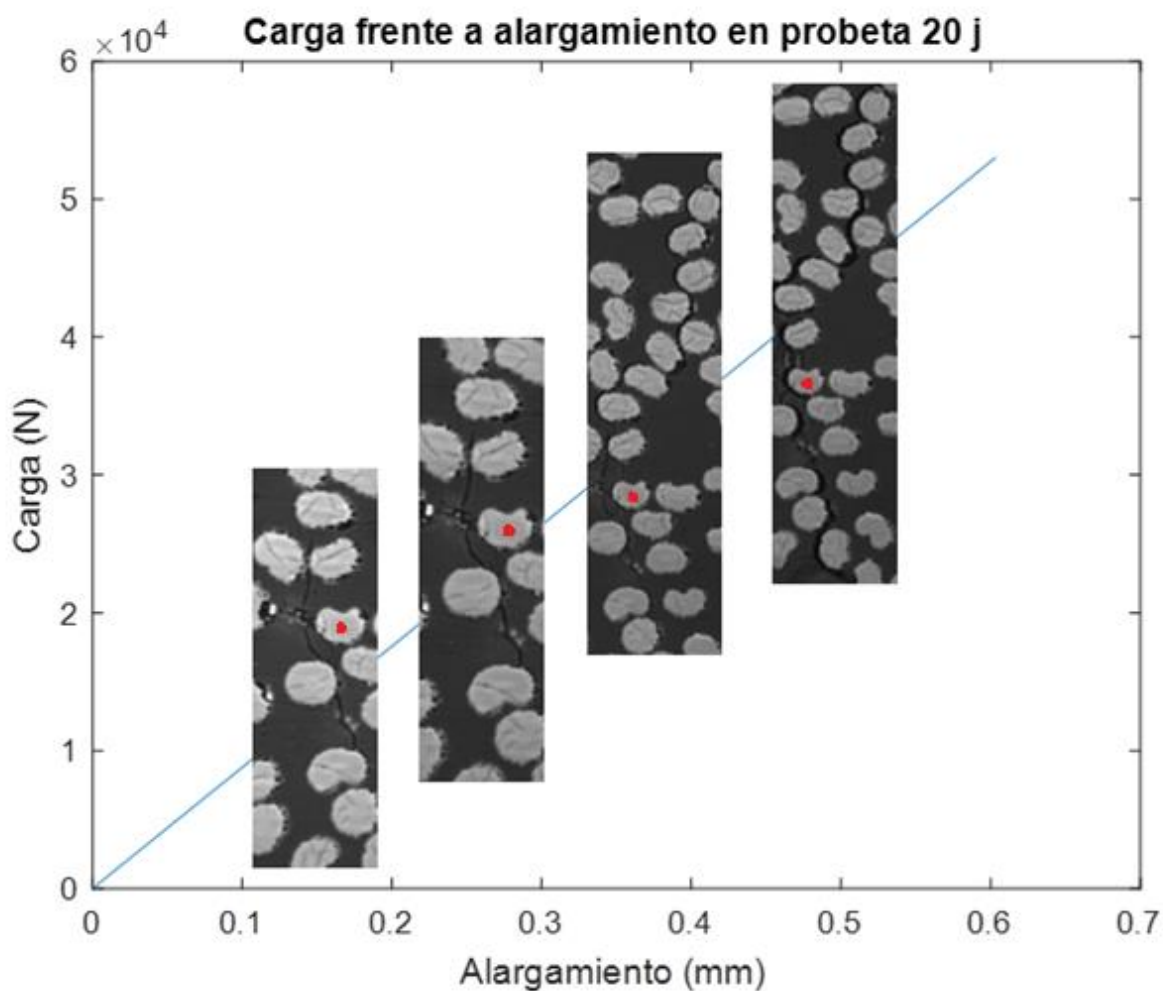


Figura 5.27 Gráfico Carga - Alargamiento junto con la evolución de la primera grieta en la probeta 20 j.

En este caso, antes de mostrar algunas fotos del proceso es importante comentar que al ser una de las primeras probetas que se ensayó, se dio por hecho que se había encontrado un cierto tipo de daño, pero después de haber ensayado todas las probetas se confirmó casi con toda seguridad que este daño ya estaba en la probeta antes de

ser ensayada. Se hizo el seguimiento de 4 o 5 pequeñas grietas que se encontraron al cargar la probeta, pero esta fue la única que creció y al final se dedujo que todas eran grietas que habían estado presentes en la probeta desde el principio. Aún así, puede ser interesante mostrar su crecimiento por lo que a continuación, desde la Figura 5.28 a la 5.33, se muestran las micrografías tomadas en cada ensayo para mostrar la forma en la que creció el mencionado daño.

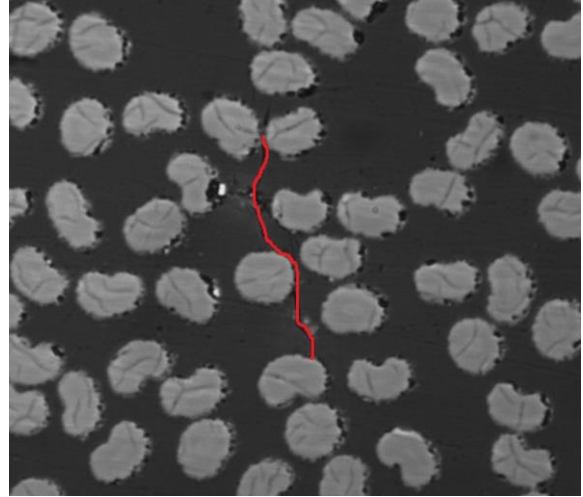
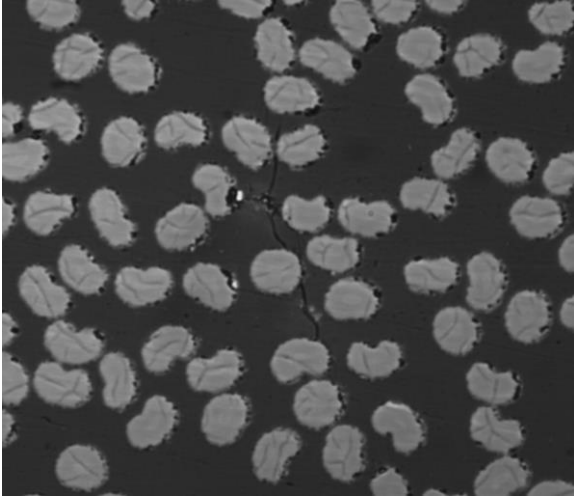


Figura 5.28 Primer fallo a 12000 N (izquierda) con los despegues en rojo (derecha) en la probeta 20 j.

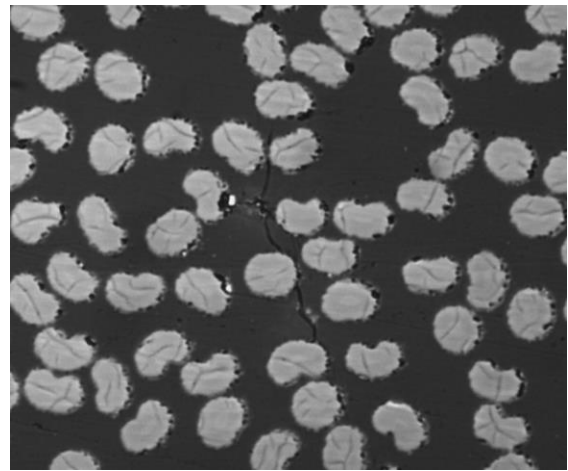
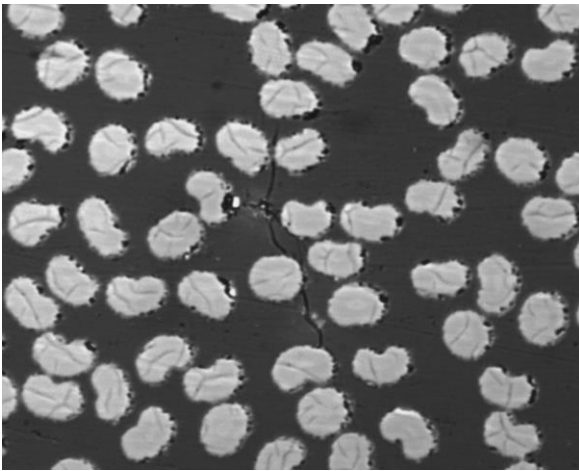


Figura 5.29 Estado de la grieta a 15000 N (izquierda) y 20000 N (derecha) en la probeta 20 j.

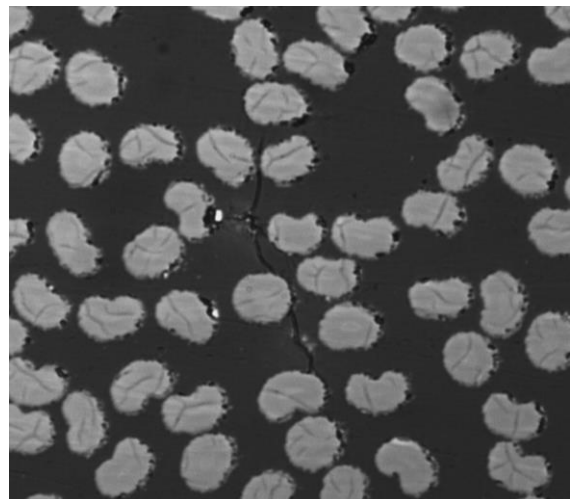
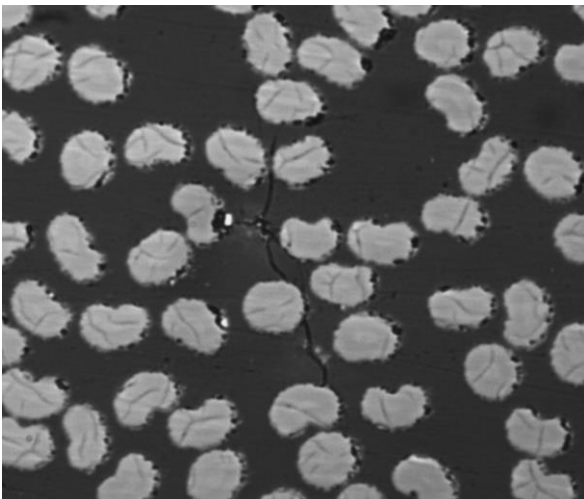


Figura 5.30 Estado de la grieta a 25000 N (izquierda) y 30000 N (derecha) en la probeta 20 j.

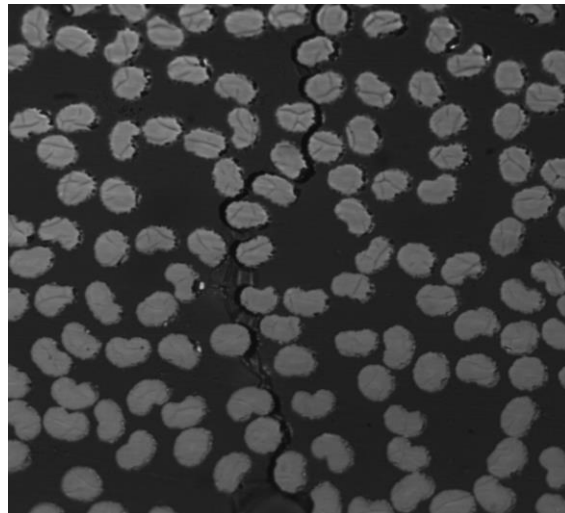
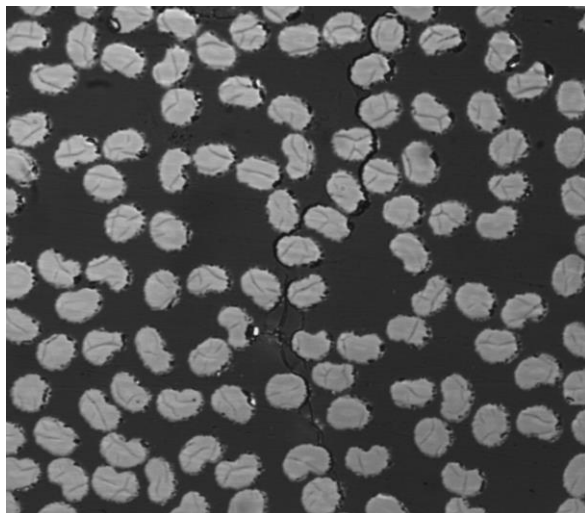


Figura 5.31 Estado de la grieta a 35000 N (izquierda) y 40000 N (derecha) en la probeta 20 j.

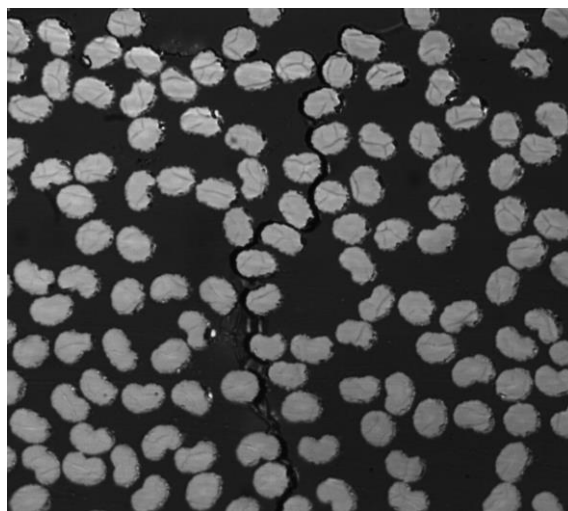
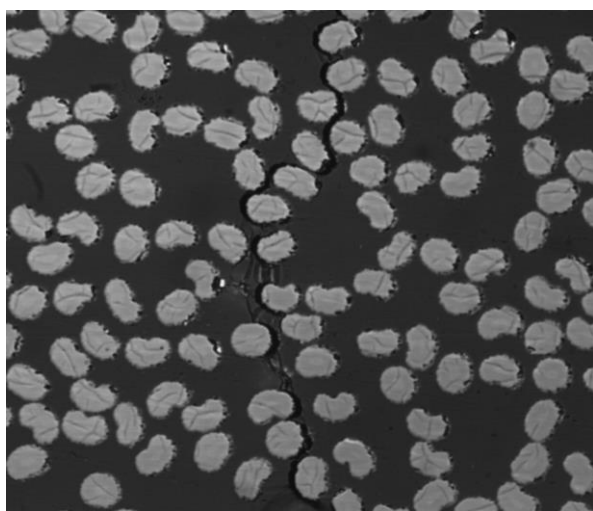


Figura 5.32 Estado de la grieta a 45000 N (izquierda) y 50000 N (derecha) en la probeta 20 j.

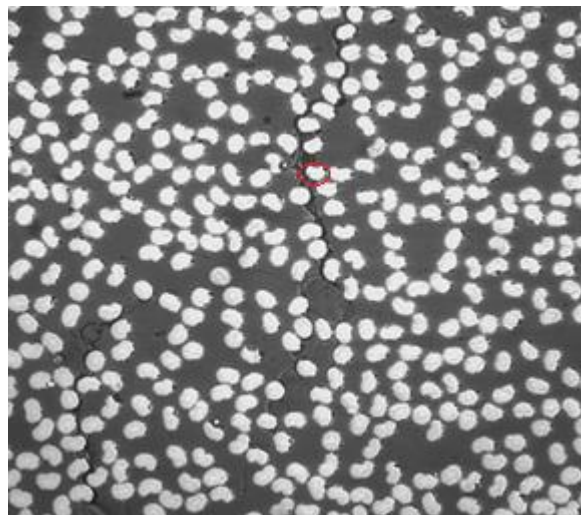
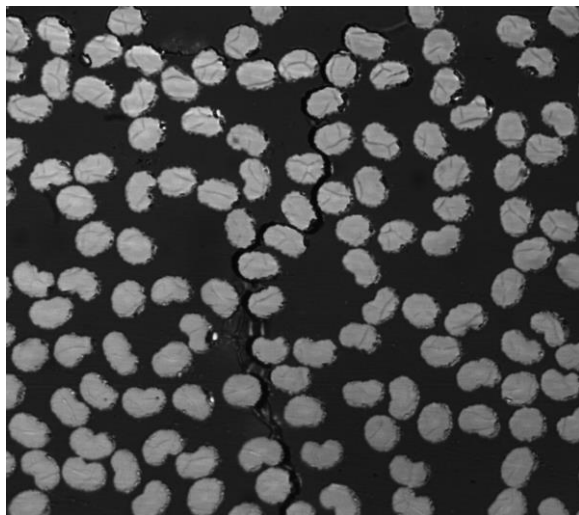


Figura 5.33 Estado de la grieta a 50000 N en la probeta 20 d a distintos aumentos (x500 izq. y x100 der).

Se observa cómo este primer fallo encontrado finalmente se convirtió en una grieta que atravesaba transversalmente toda la capa de 90. En este caso, la grieta no creció lo suficiente para alcanzar la interfase entre láminas y dar lugar a una posible futura delaminación.

5.2 Estudio del daño en las probetas del material de 30 gsm

Una vez estudiadas las probetas de 20 gsm, pasamos a las de 30 gsm. El formato se mantendrá igual que con las probetas anteriores, de forma que habrá una franja azul oscuro en la columna de la deformación con las deformaciones calculadas a través del módulo de Young y una fila roja, que indicará la carga a la que se observó el primer fallo, todo ello seguido de las imágenes capturadas del microscopio.

5.2.1 Probeta 30 b

Comenzaremos con la probeta 30 b. En la Tabla 5.10 se enumeran el número de descargas realizadas en la probeta, las fuerzas y cargas a las que se han realizado dichas descargas y las deformaciones asociadas.

Tabla 5.10 Datos obtenidos de los ensayos de la probeta 30 b.

Ensayo	Fuerza máx (N)	Tensión máx (Mpa)	Deformación (%)
1	14783,67	282,165	0,29400
2	17314,65	330,472	0,34220
3	19786,77	377,656	0,38660
4	22347,18	426,525	0,41200
5	24672,15	470,900	0,51400
6	29626,2	565,454	0,60260
7	34599,87	660,383	0,72077
8	39387,15	751,755	0,82050
9	44380,44	847,058	0,92452
10	49314,87	941,238	1,02731
11	54278,73	1035,980	1,13072

12	59095,44	1127,913	1,23106
13	59075,82	1127,538	1,23065

Tal y como se ha estado haciendo hasta ahora, en la Figura 5.34 se muestra la evolución del primer fallo, que apareció aproximadamente a una carga de 15000 N, sobre la gráfica que relaciona la carga con la deformación del extensómetro obtenida con Matlab.

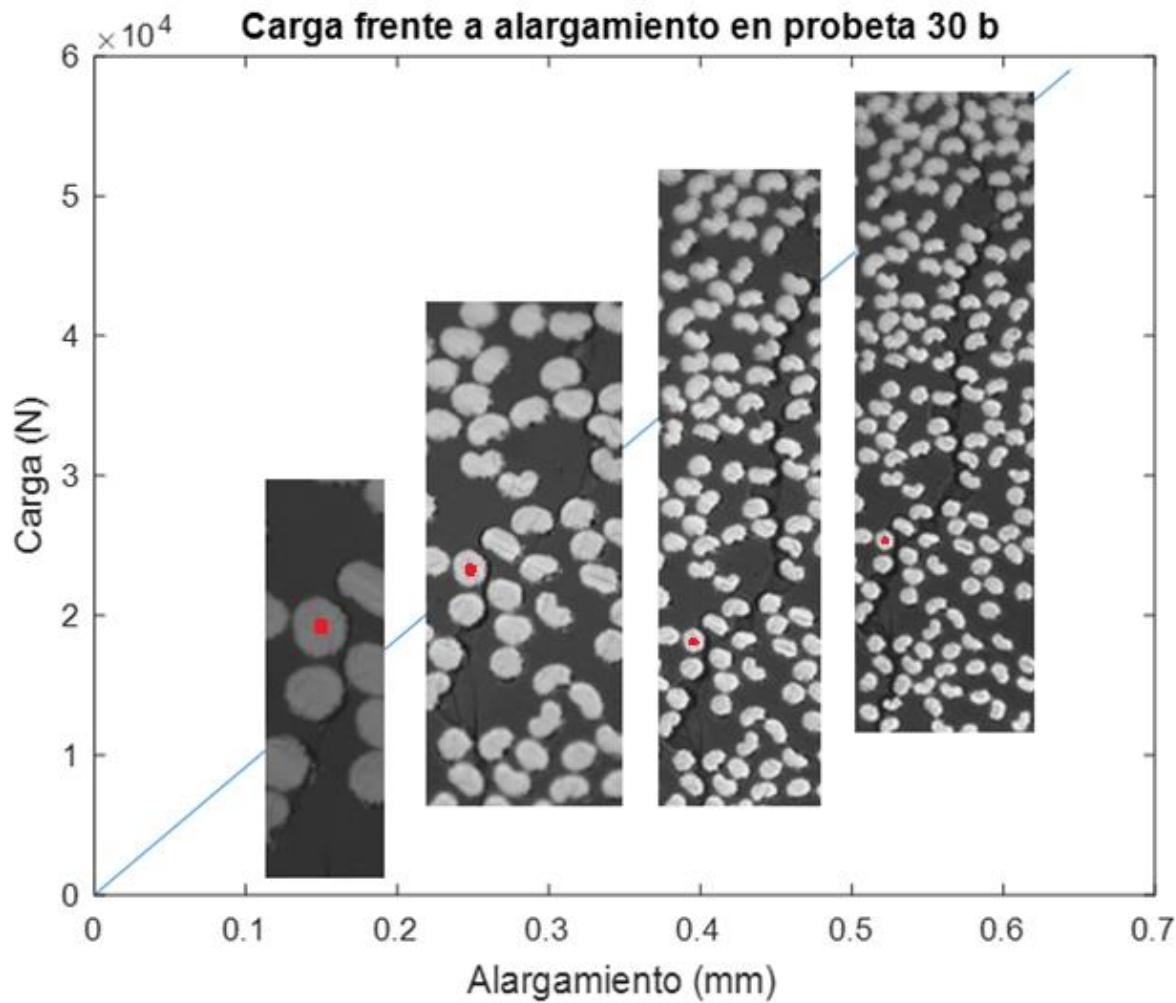


Figura 5.34 Gráfico Carga - Alargamiento junto con la evolución de la primera grieta en la probeta 30 b.

A continuación, desde la Figura 5.35 a la 5.40, se muestran las micrografías tomadas en cada descarga de la probeta para mostrar la forma en la que creció el daño, que de nuevo se convirtió en una grieta de gran tamaño con delaminación.

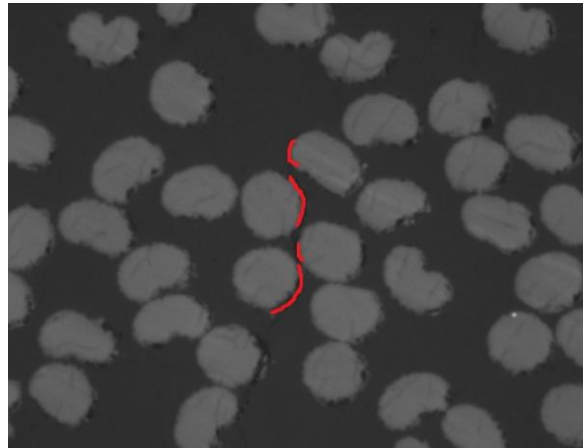
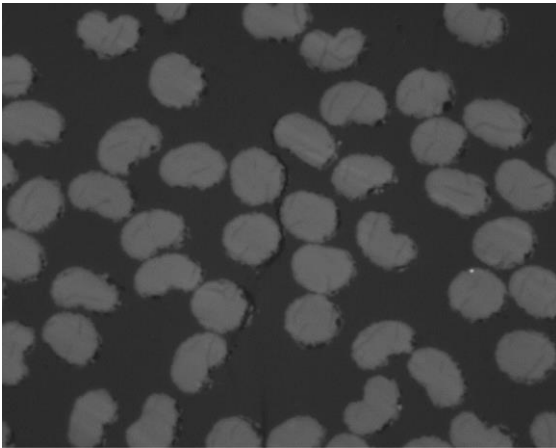


Figura 5.35 Primer fallo a 15000 N (izquierda) con los despegues en rojo (derecha) en la probeta 30 b.

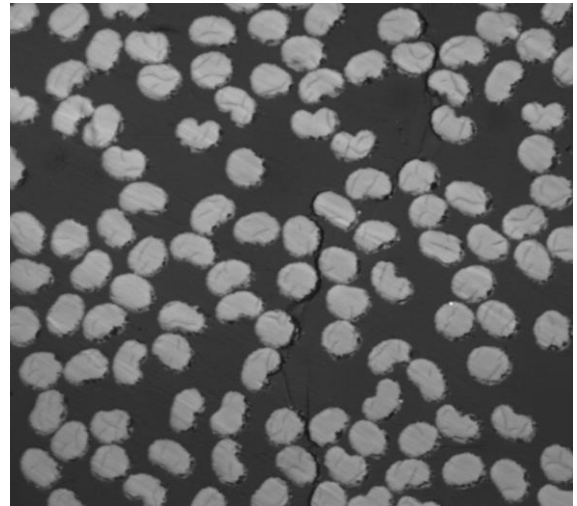
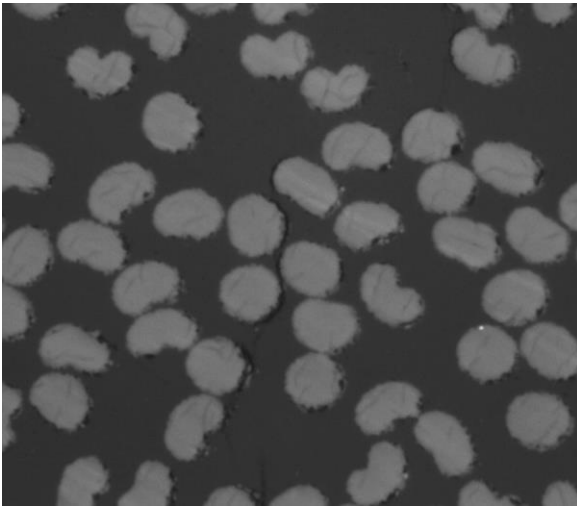


Figura 5.36 Estado de la grieta a 20000 N (izquierda) y 25000 N (derecha) en la probeta 30 b.

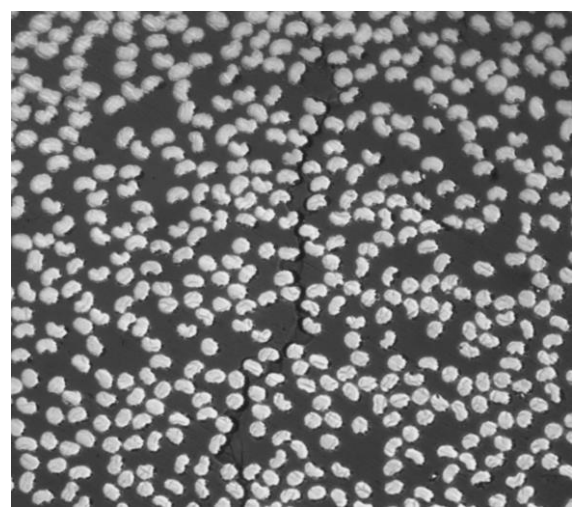
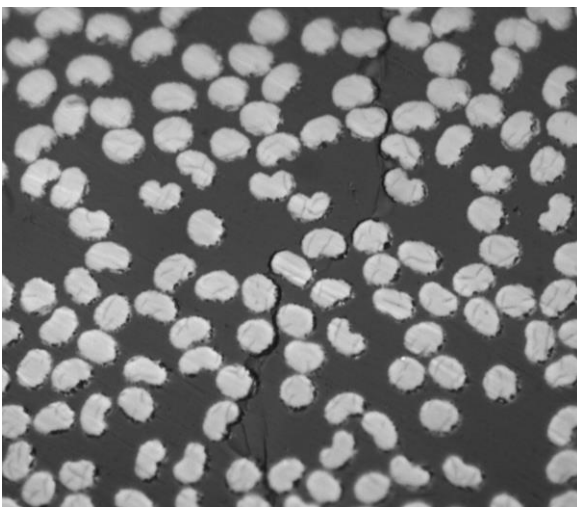


Figura 5.37 Estado de la grieta a 30000 N (izquierda) y 35000 N (derecha) en la probeta 30 b.

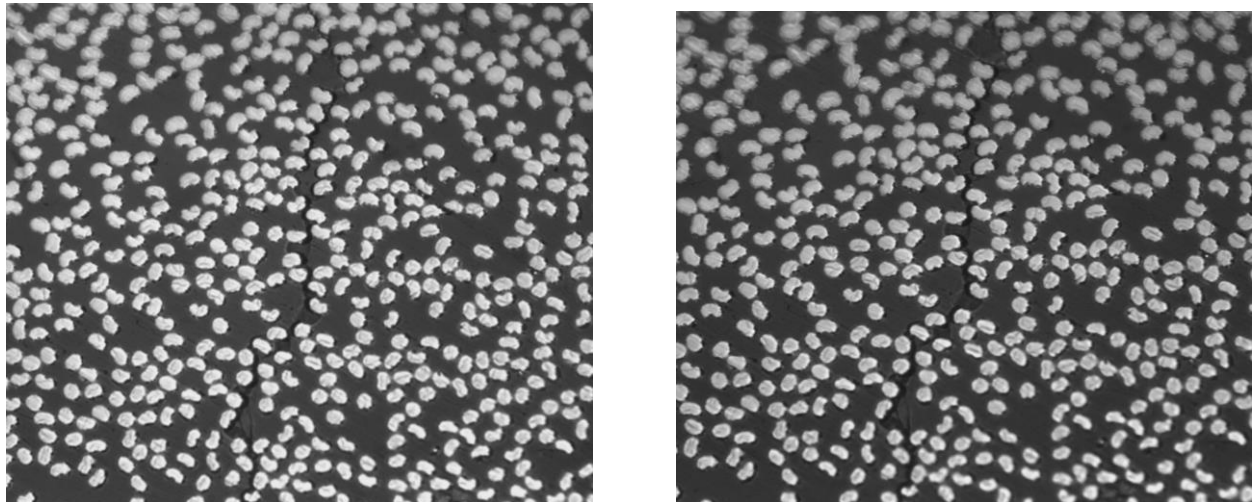


Figura 5.38 Estado de la grieta a 40000 N (izquierda) y 45000 N (derecha) en la probeta 30 b.

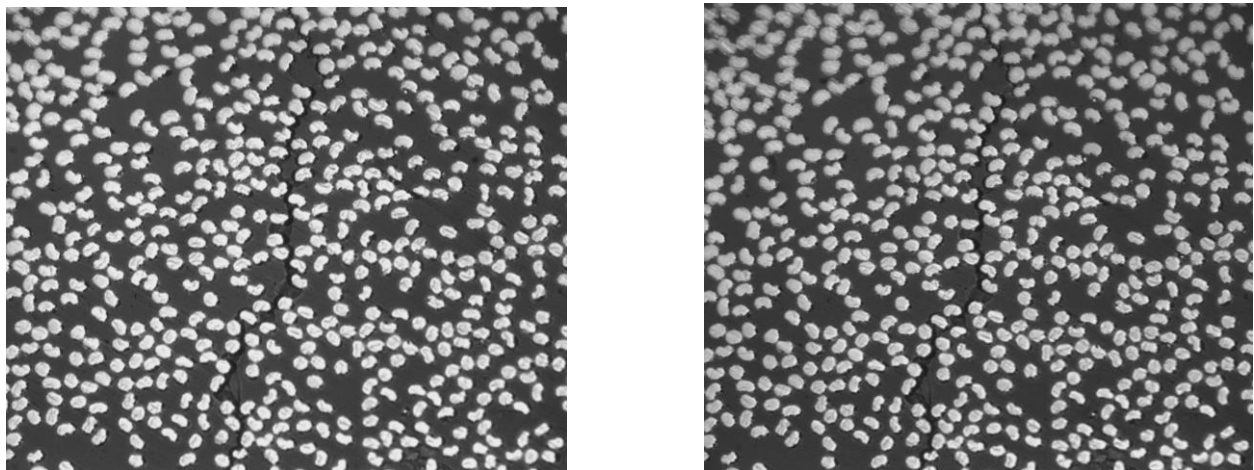


Figura 5.39 Estado de la grieta a 50000 N (izquierda) y 55000 N (derecha) en la probeta 30 b.

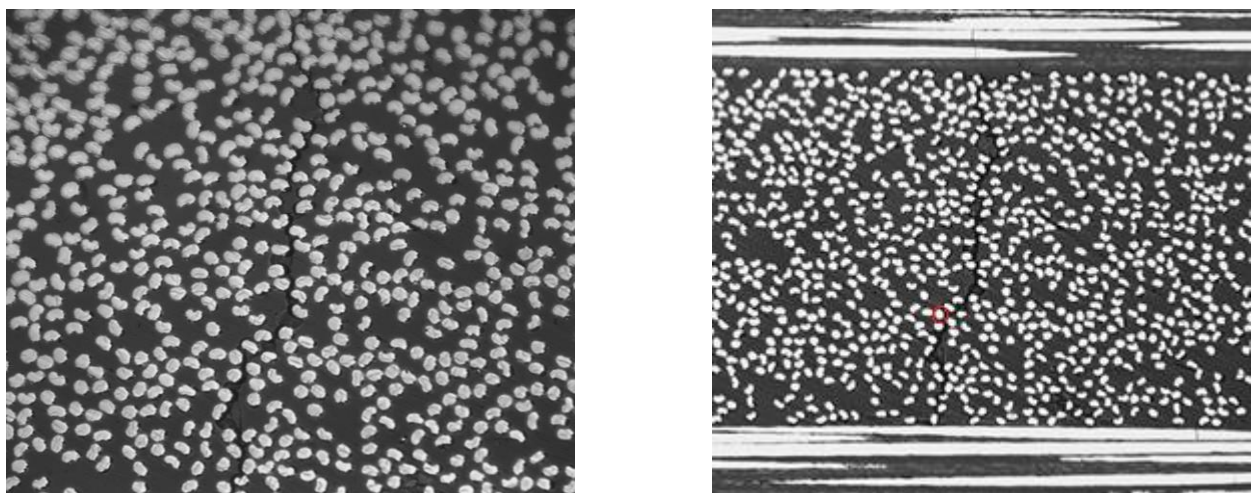


Figura 5.40 Estado de la grieta a 60000 N en la probeta 30 b a distintos aumentos (x500 izq. y x100 der).

Es importante destacar que en esta probeta aparecieron grietas longitudinales y transversales antes de ser ensayada en la zona media de la capa de 90, por lo que también se les hizo un seguimiento. Todas estas grietas

crecieron y se muestran a continuación, desde la Figura 5.41 a la 5.44. Con intención de no cargar demasiado de imágenes el trabajo, sólo se van a mostrar las imágenes de cómo estaban inicialmente y cómo acabaron tras los 60000 N de carga.

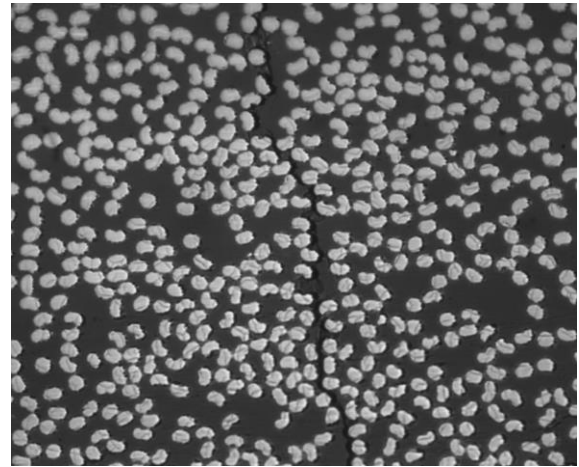
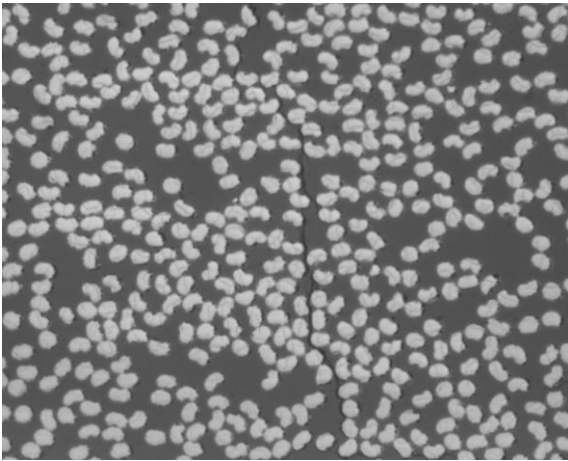


Figura 5.41 Estado de grieta transversal 1 sin cargar (izquierda) y tras 60000 N (derecha) en la probeta 30 b.

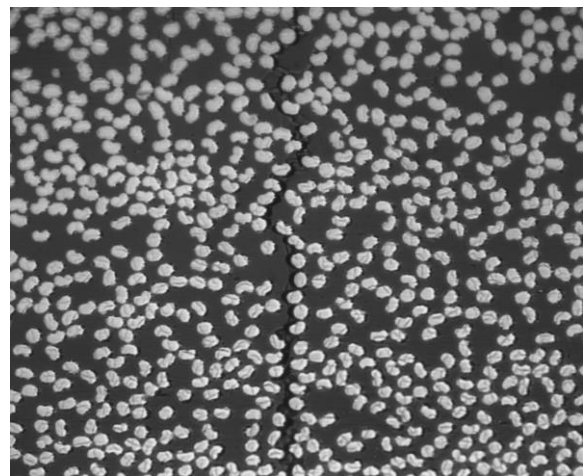
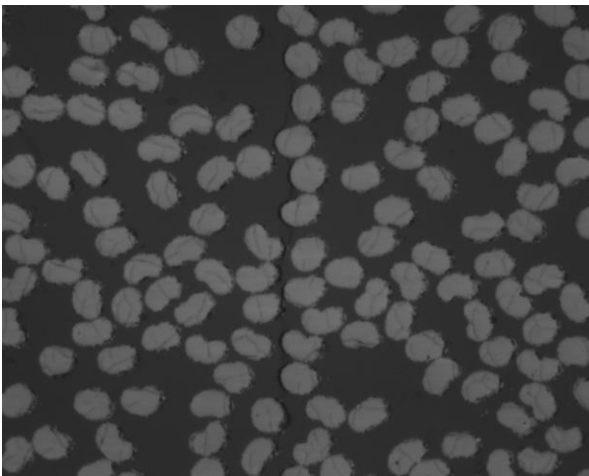


Figura 5.42 Estado de grieta transversal 2 sin cargar (izquierda) y tras 60000 N (derecha) en la probeta 30 b.

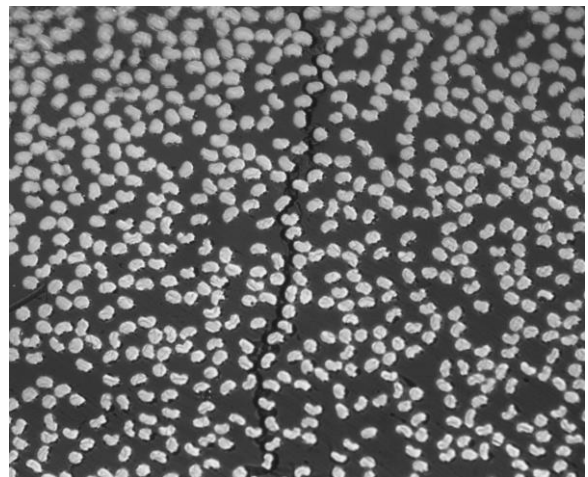
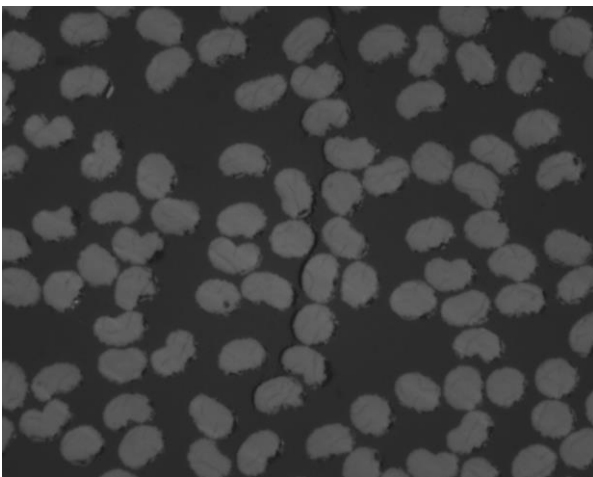


Figura 5.43 Estado de grieta transversal 3 sin cargar (izquierda) y tras 60000 N (derecha) en la probeta 30 b.

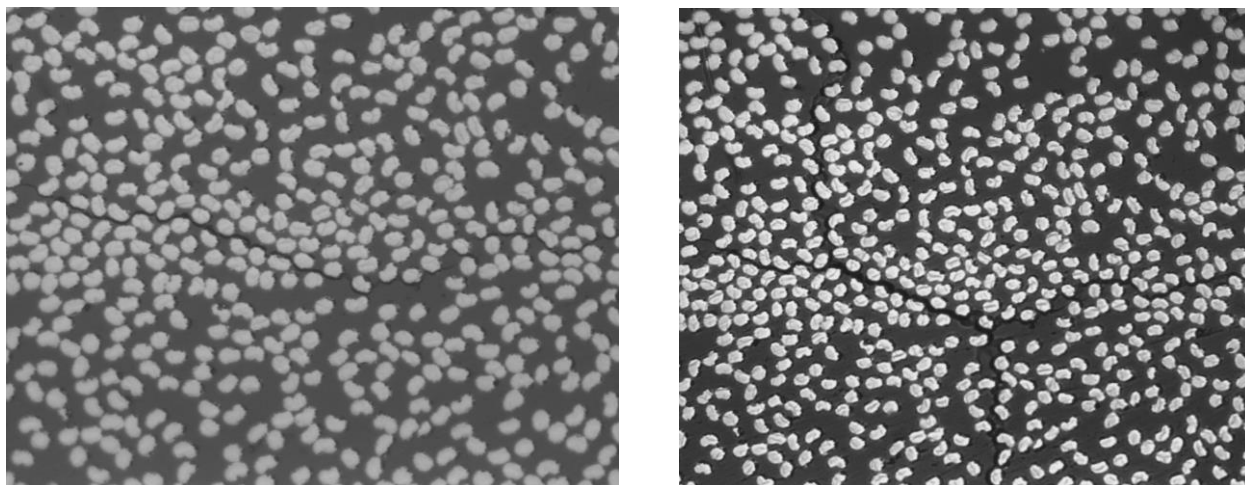


Figura 5.44 Estado de grieta horizontal sin cargar (izquierda) y tras 60000 N (derecha) en la probeta 30 b.

Tal y como se puede observar, todas las grietas crecieron hasta atravesar transversalmente la capa de 90, convirtiéndose en grietas de gran tamaño.

5.2.2 Probeta 30 f

Pasamos ahora a la probeta 30 f. En la Tabla 5.11 se enumeran el número de descargas realizadas, las fuerzas y cargas a las que se han realizado dichas descargas y las deformaciones asociadas.

Tabla 5.11 Datos obtenidos de los ensayos de la probeta 30 f.

Ensayo	Fuerza máx (N)	Tensión máx (Mpa)	Deformación (%)
1	14852,34	282,065	0,28460
2	17295,03	328,455	0,33960
3	19776,96	386,984	0,42820
4	22258,89	422,725	0,43360
5	24819,3	471,350	1,25500
6	27968,31	531,154	0,53160
7	29842,02	566,738	0,58380
8	34521,39	655,606	0,68879
9	39465,63	749,503	0,78744
10	44341,2	842,096	0,88472

11	49354,11	937,298	0,98474
12	54121,77	1027,842	1,07986
13	59095,44	1122,298	1,17910
14	65256,12	1239,298	1,30202

Tal y como se puede observar en los datos de la tabla 4.13, lo más característico de esta probeta fue lo tarde que apareció el primer daño. Tras una intensa búsqueda de una primera grieta cada vez que se cargaba el material, el primer despegue no apareció hasta que se alcanzaron los 40000 N. Además, a medida que fue creciendo se unió con una de las grietas horizontales inferiores que aparecieron antes de cargar la probeta.

En la Figura 5.45 volvemos a mostrar la evolución del daño sobre la gráfica que representa la relación entre la carga y la deformación del extensómetro obtenida con Matlab.

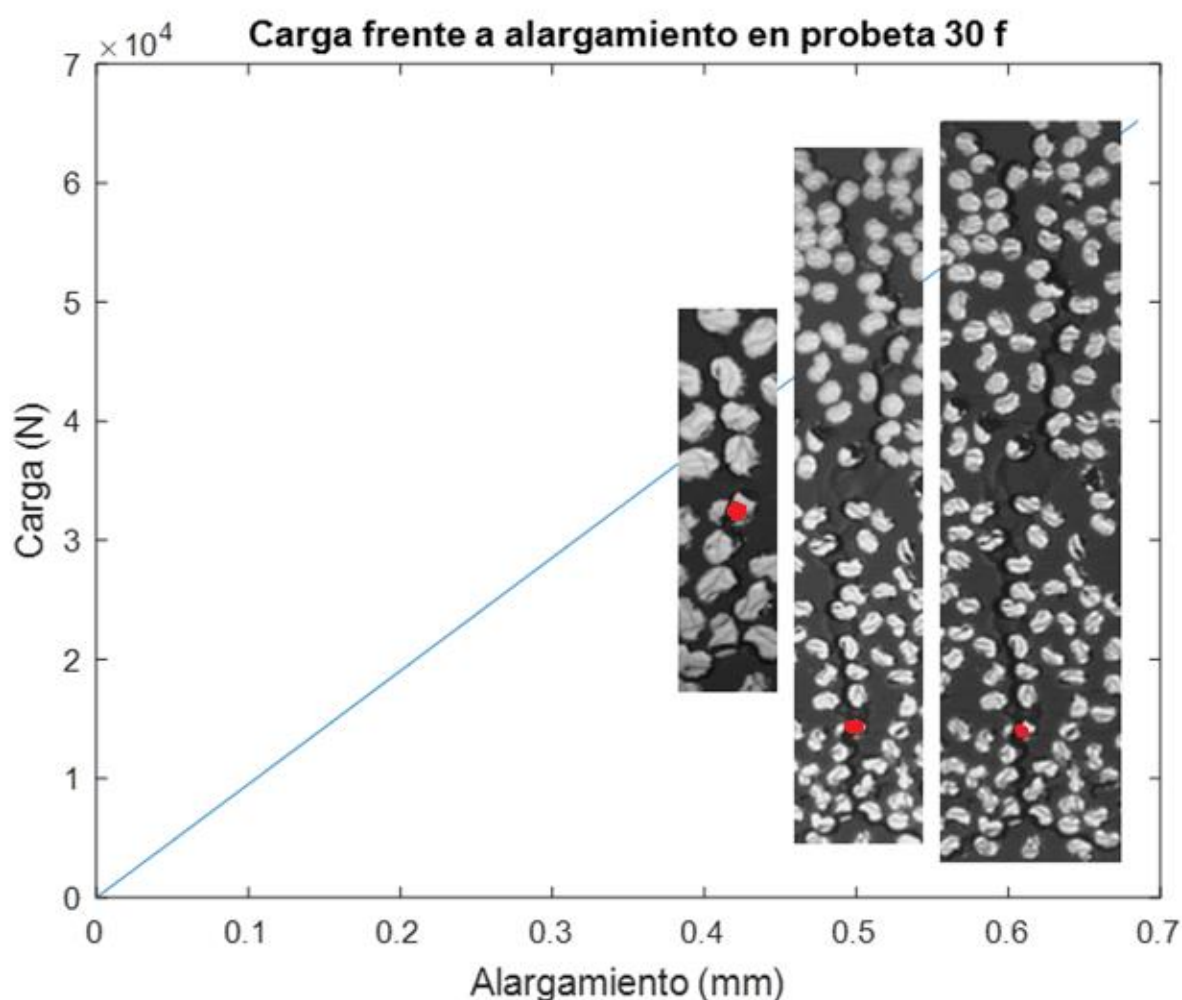


Figura 5.45 Gráfico Carga - Alargamiento junto con la evolución de la primera grieta en la probeta 30 f.

A continuación, desde la Figura 5.46 a la 5.49, se muestran las micrografías tomadas en cada ensayo para mostrar la forma en la que creció el daño.

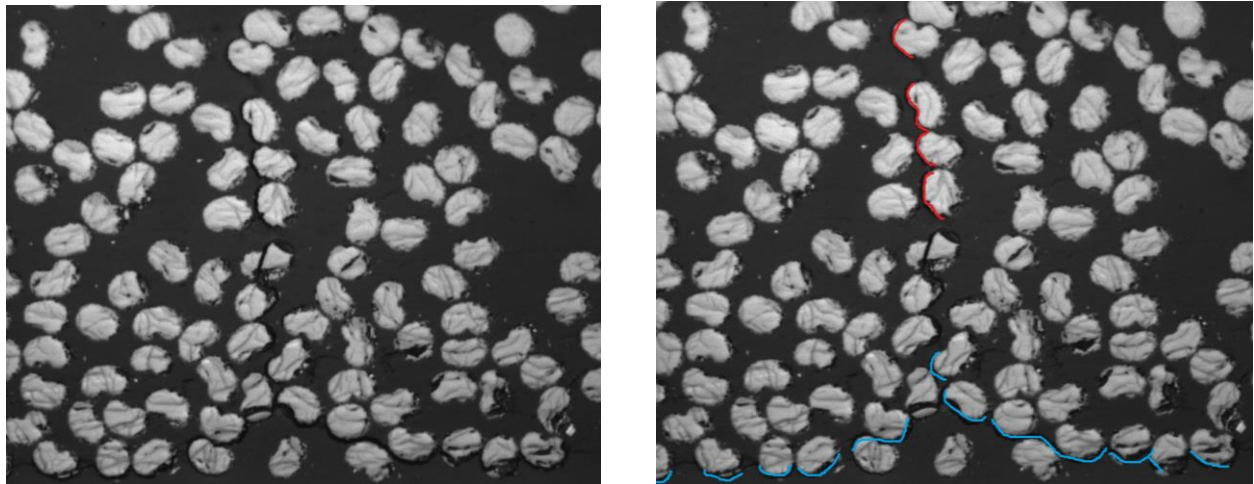


Figura 5.46 Primer fallo a 40000 N (izquierda) con los despegues en rojo y la grieta inicial en azul(derecha) en la probeta 30f.

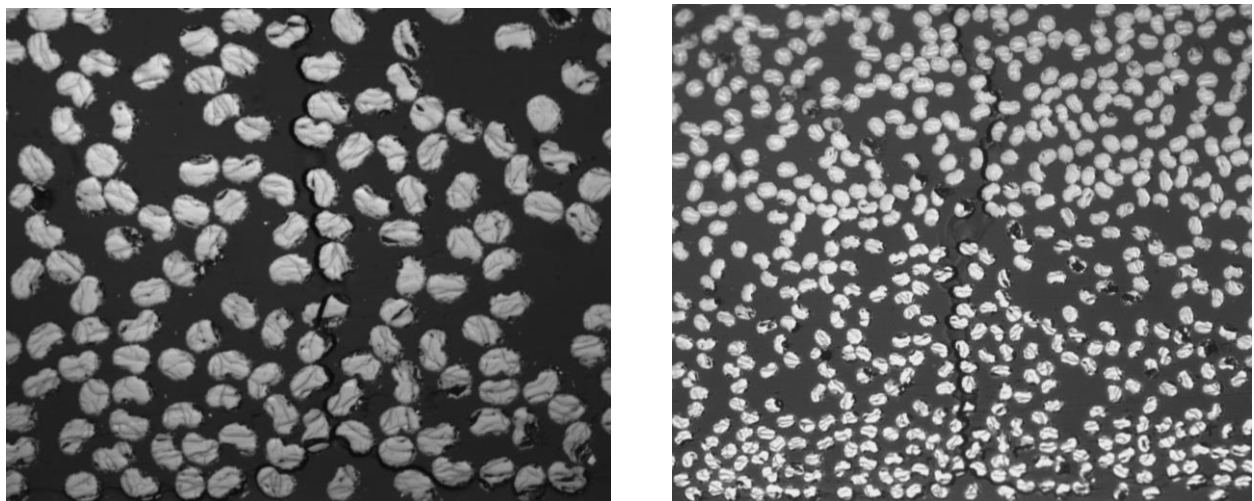


Figura 5.47 Estado de la grieta a 45000 N (izquierda) y 50000 N (derecha) en la probeta 30f.

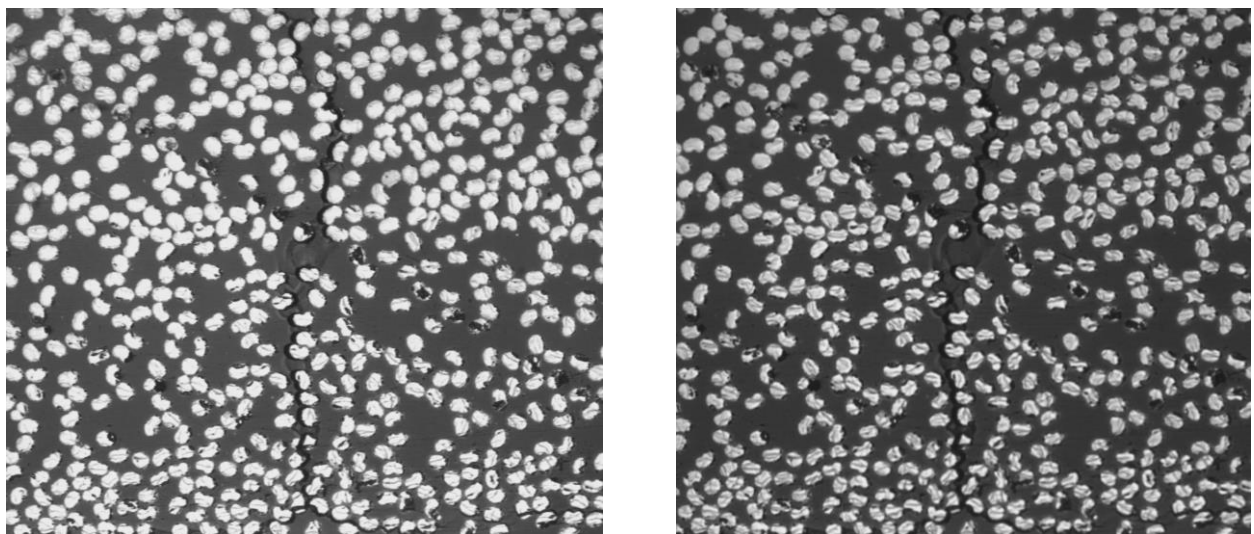


Figura 5.48 Estado de la grieta a 55000 N (izquierda) y 60000 N (derecha) en la probeta 30f.

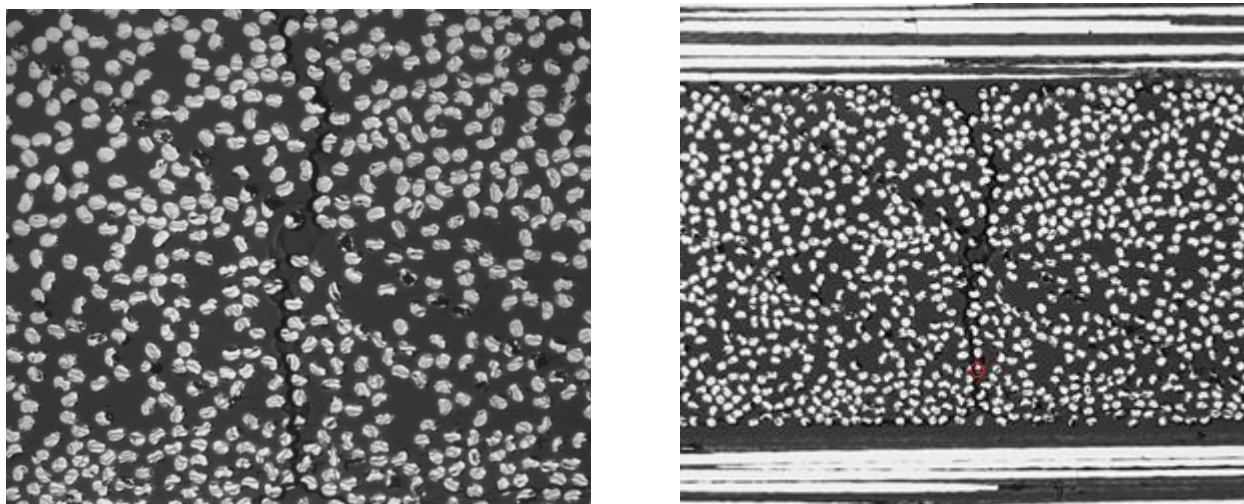


Figura 5.49 Estado de la grieta a 60000 N en la probeta 30 f a distintos aumentos (x500 izq. y x100 der).

Se observa cómo el primer daño encontrado finalmente se convirtió en una gran grieta que atravesaba transversalmente toda la capa de 90. Además, se puede ver la presencia de un daño avanzado asociado a la delaminación, pues la grieta se propaga longitudinalmente por los extremos de la interfase de la capa de 90 y 0 grados.

5.2.3 Probeta 30 g

La siguiente probeta a estudiar es la correspondiente al uso de láminas de 30 gsm. En la Tabla 5.12 se enumeran de nuevo el número de descargas, las fuerzas y cargas a las que se han realizado dichas descargas y las deformaciones asociadas.

Tabla 5.12 Datos obtenidos de los ensayos de la probeta 30 g.

Ensayo	Fuerza máx (N)	Tensión máx (Mpa)	Deformación (%)
1	14793,48	288,119	0,27780
2	17295,03	336,839	0,33280
3	19796,58	385,560	0,37720
4	24672,15	480,517	0,46840
5	29586,96	576,238	0,58260
6	34619,49	674,252	0,69977
7	39465,63	768,636	0,79773
8	44419,68	865,121	0,89786

9	49275,63	959,696	0,99602
10	54200,25	1060,559	1,10070
11	59115,06	1151,330	1,19490
12	66188,07	1289,085	1,33787

Por tanto, de la Tabla 5.12 obtenemos que el primer daño fue detectado tras aplicar una carga aproximada de 15000 N.

En la Figura 5.50 volvemos a mostrar la evolución del primer daño sobre la gráfica en la que se representa la relación entre la carga y la deformación del extensómetro obtenida con Matlab. Seguidamente se mostrarán algunas de las fotos tomadas durante el proceso.

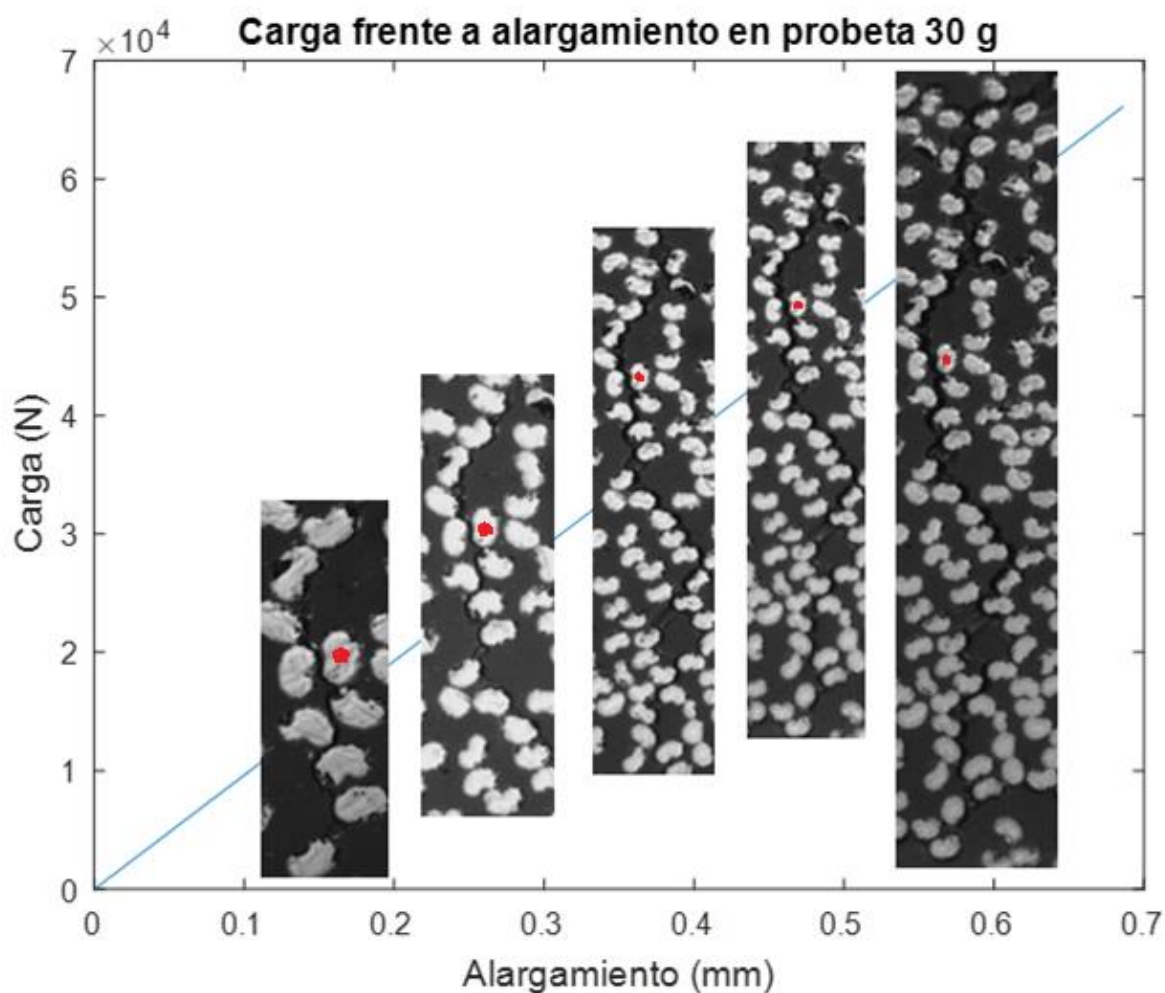


Figura 5.50 Gráfico Carga - Alargamiento junto con la evolución de la primera grieta en la probeta 30 g.

A continuación, desde la Figura 5.51 a la 5.56, se muestran las micrografías tomadas en cada ensayo para mostrar la forma en la que creció el daño.

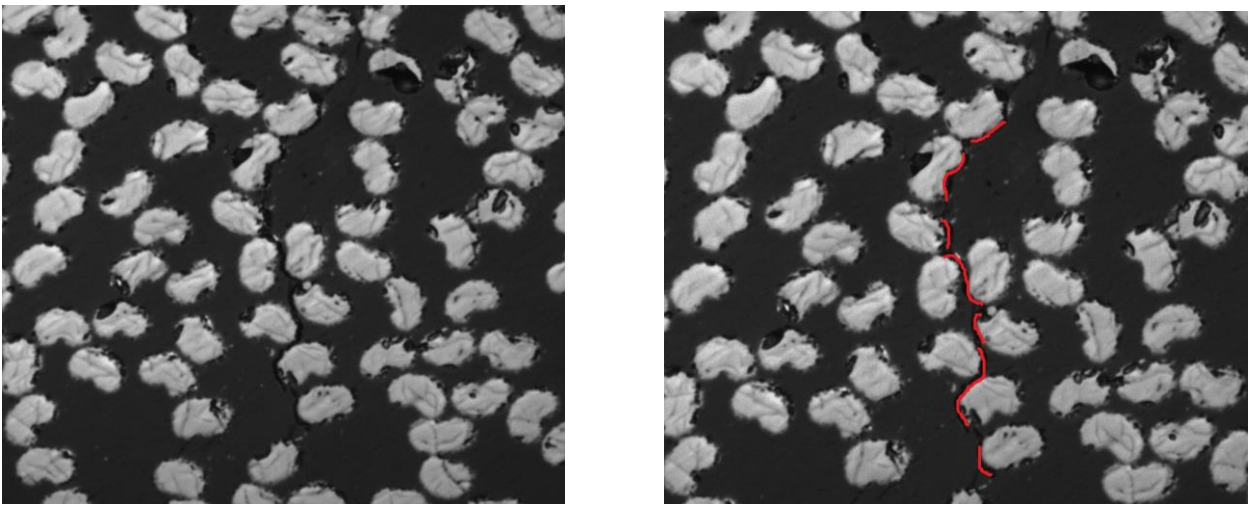


Figura 5.51 Primer fallo a 15000 N (izquierda) con los despegues en rojo (derecha) en la probeta 30 g.

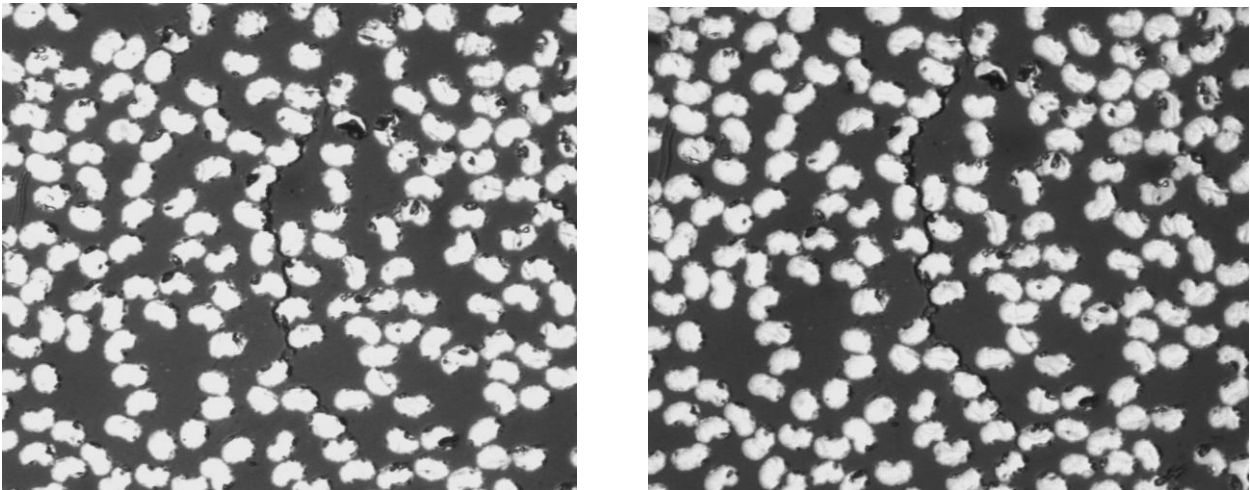


Figura 5.52 Estado de la grieta a 20000 N (izquierda) y 25000 N (derecha) en la probeta 30 g.

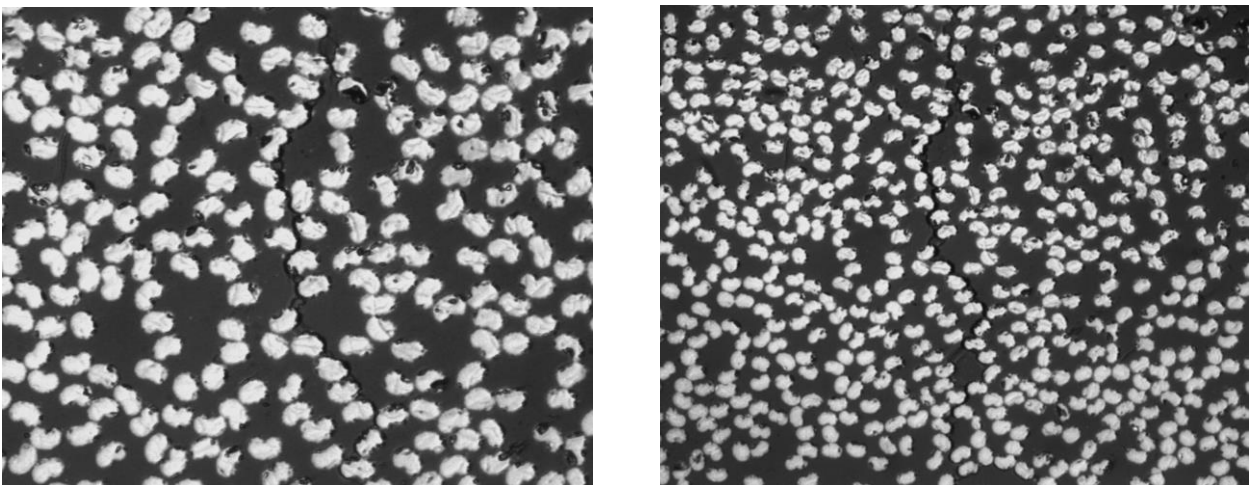


Figura 5.53 Estado de la grieta a 30000 N (izquierda) y 35000 N (derecha) en la probeta 30 g.

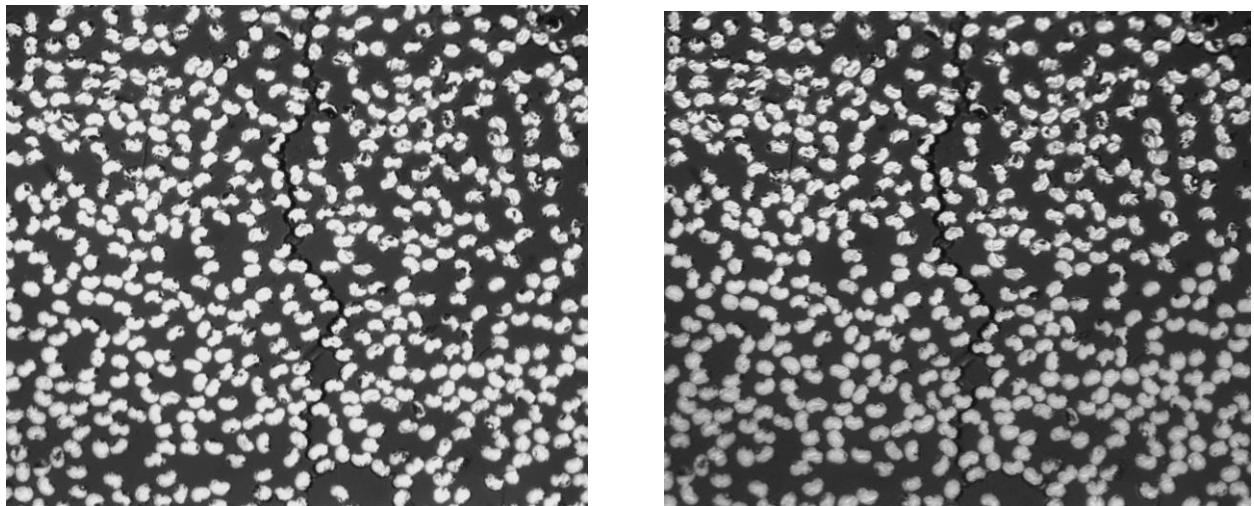


Figura 5.54 Estado de la grieta a 40000 N (izquierda) y 45000 N (derecha) en la probeta 30 g.

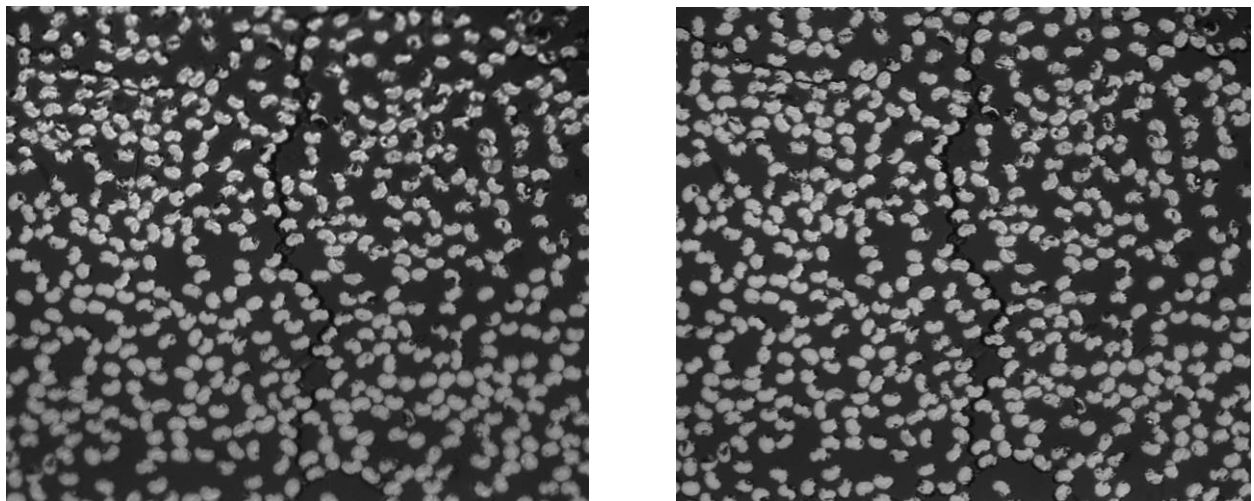


Figura 5.55 Estado de la grieta a 50000 N (izquierda) y 55000 N (derecha) en la probeta 30 g.

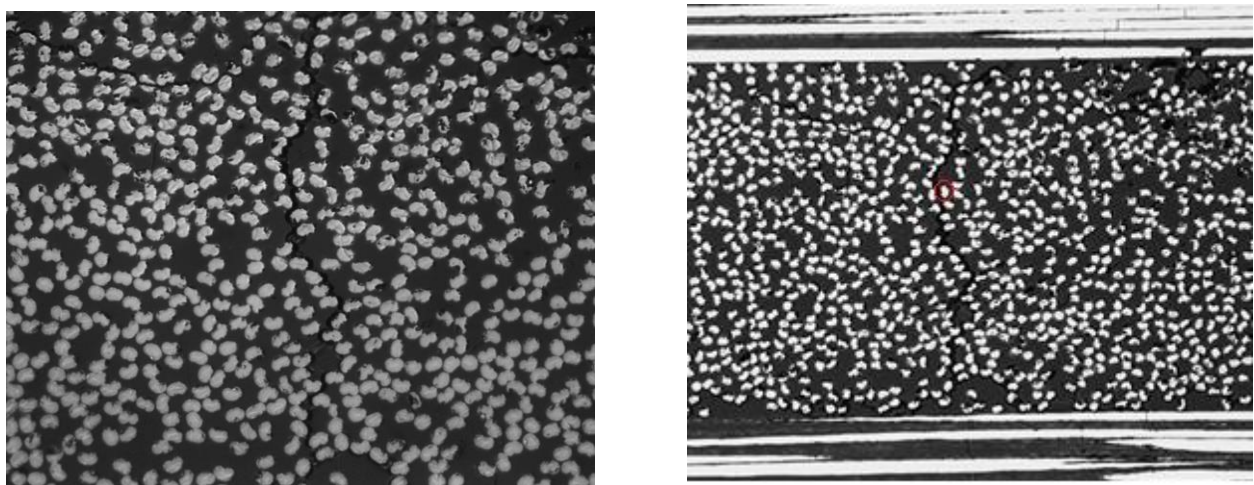


Figura 5.56 Estado de la grieta a 60000 N en la probeta 30 g a distintos aumentos (x500 izq. y x100 der).

Nuevamente, el primer fallo encontrado se convirtió en una grieta de gran tamaño que atravesaba

transversalmente toda la capa de 90. Además, se puede ver la presencia de un daño avanzado asociado a la delaminación.

5.2.4 Probeta 30 h

La siguiente probeta para analizar es la 30 h. En la Tabla 5.13 se enumeran el número de descargas realizadas, las fuerzas y cargas a las que se han realizado dichas descargas y las deformaciones asociadas.

Tabla 5.13 Datos obtenidos de los ensayos de la probeta 30 h.

Ensayo	Fuerza máx (N)	Tensión máx (Mpa)	Deformación (%)
1	7.892.145	155076,064	0,30200
2	8844,69	173,793	0,17720
3	9819,81	192,954	0,20800
4	10800,81	212,230	0,21480
5	12331,17	242,300	0,27920
6	14793,48	290,683	0,31400
7	17265,6	339,259	0,33960
8	19727,91	387,642	0,40680
9	22209,84	436,410	0,45640
10	24662,34	484,601	0,49400
11	27095,22	532,405	0,52620
12	29547,72	580,596	0,59320
13	32039,46	629,557	0,63620
14	34482,15	677,554	0,71247
15	39406,77	774,320	0,81422
16	44243,1	869,351	0,91415
17	49236,39	967,466	1,01732
18	54102,15	1063,076	1,11786

19	58938,48	1158,107	1,21778
20	61489,08	1208,225	1,27048

Al igual que ha pasado anteriormente con otras probetas, el número de ensayos es tan alto por ser una de las primeras probetas que se ensayó, y aún se estaba buscando la carga aproximada a la que aparece el primer daño. Finalmente, éste apareció a una carga aproximada de 15000 N.

En la Figura 5.57 se puede observar la evolución del primer fallo sobre la gráfica que representa la relación entre la carga y la deformación del extensómetro obtenida con Matlab. Seguidamente se mostrarán algunas de las fotos tomadas durante el proceso.

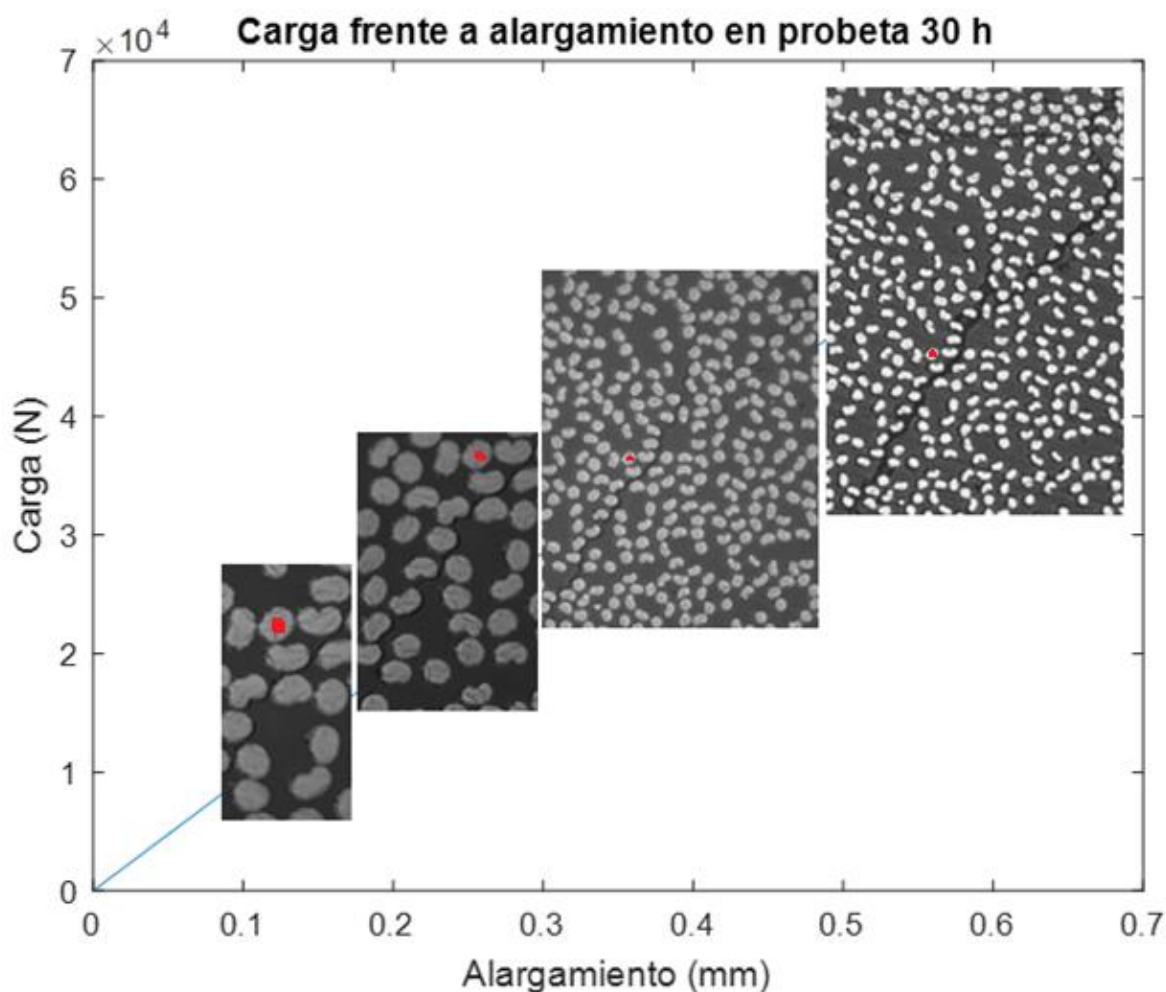


Figura 5.57 Gráfico Carga - Alargamiento junto con la evolución de la primera grieta en la probeta 30 h.

Una vez mostrados los resultados, en la Figura 5.58 y hasta la 5.63 se observan las micrografías tomadas en cada descarga para analizar la forma en la que se propagó el daño.

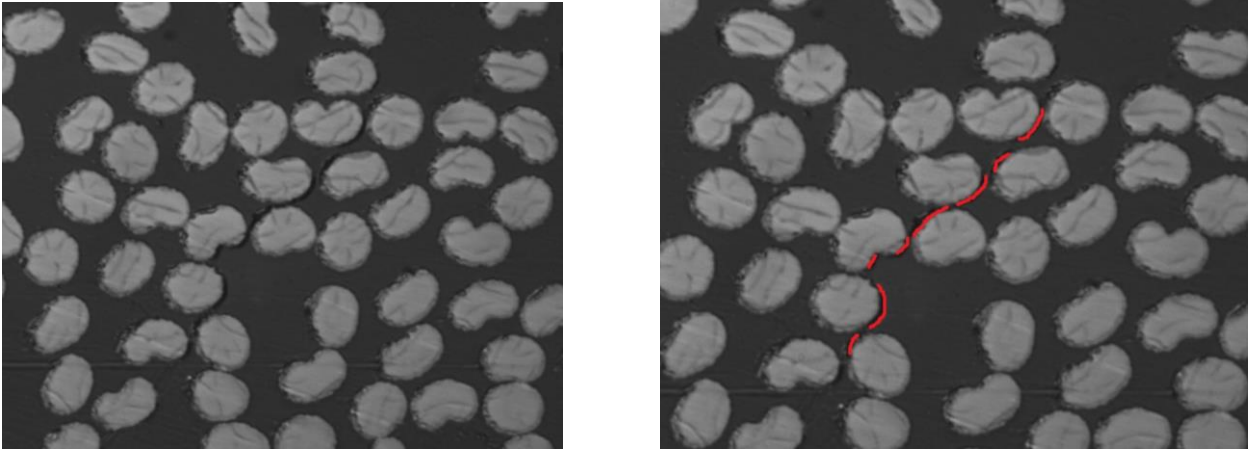


Figura 5.58 Primer fallo a 15000 N (izquierda) con los despegues en rojo (derecha) en la probeta 30 h.

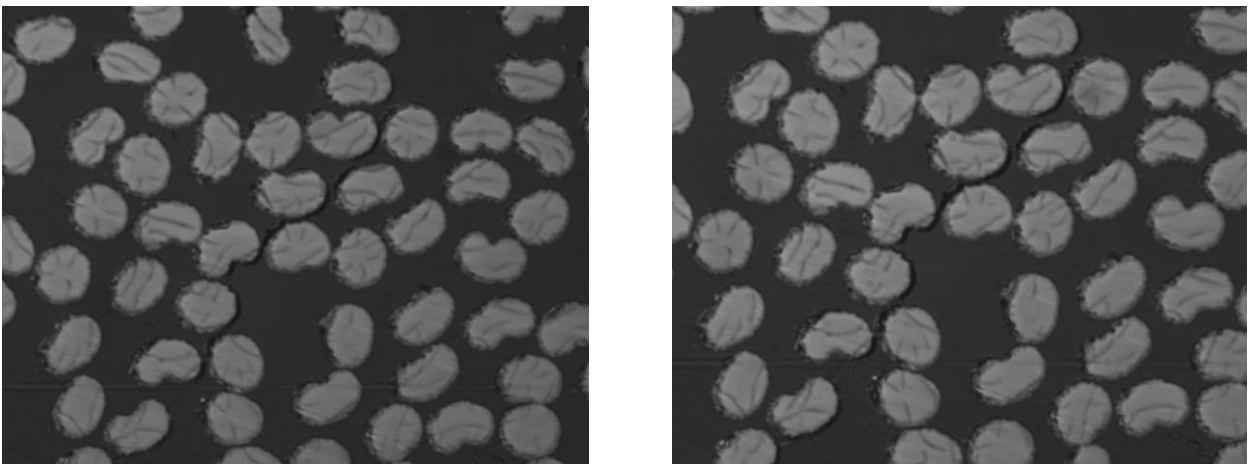


Figura 5.59 Estado de la grieta a 20000 N (izquierda) y 25000 N (derecha) en la probeta 30 h.

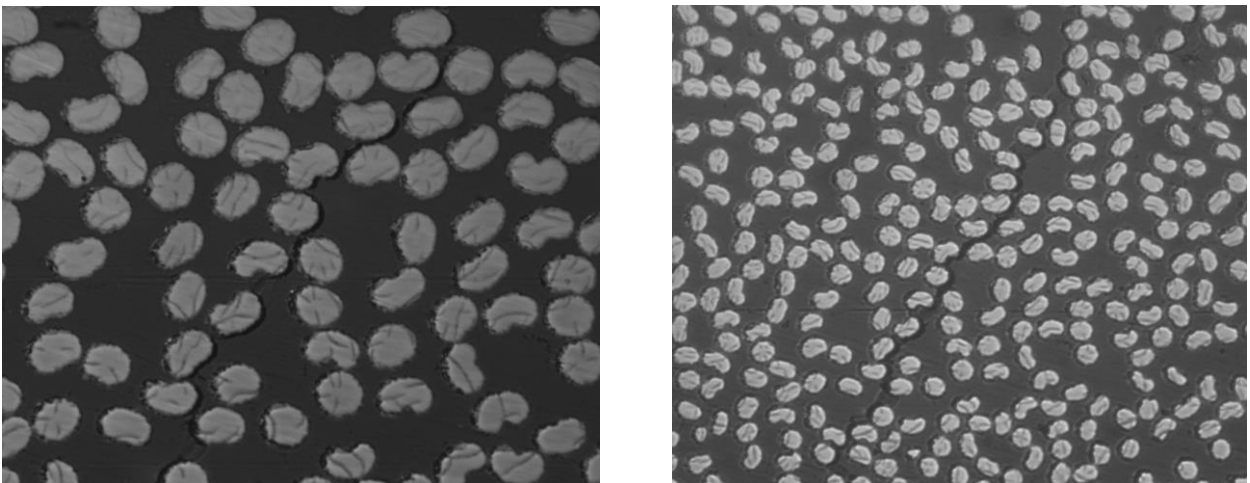


Figura 5.60 Estado de la grieta a 30000 N (izquierda) y 35000 N (derecha) en la probeta 30 h.

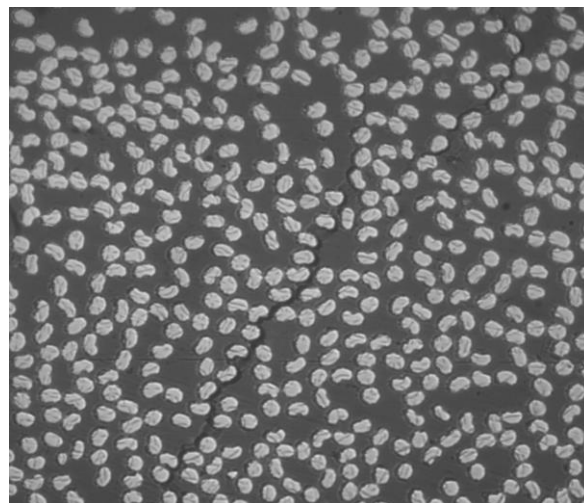
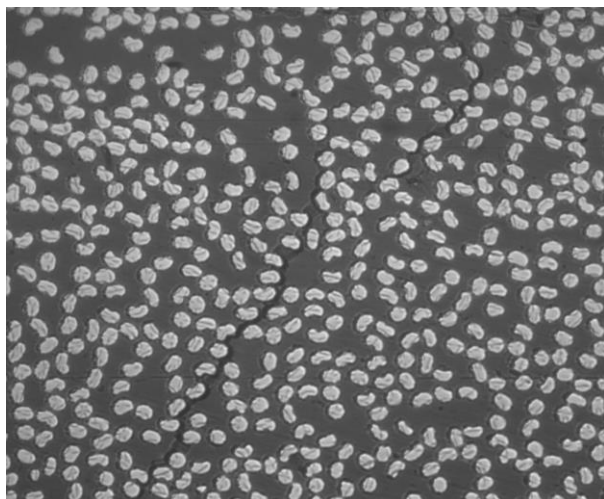


Figura 5.61 Estado de la grieta a 40000 N (izquierda) y 45000 N (derecha) en la probeta 30 h.

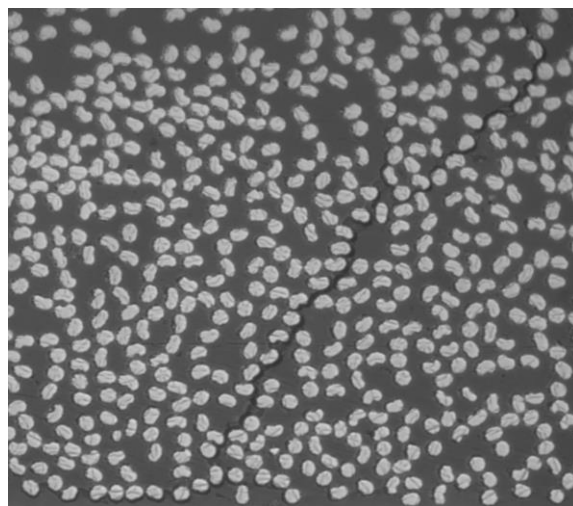
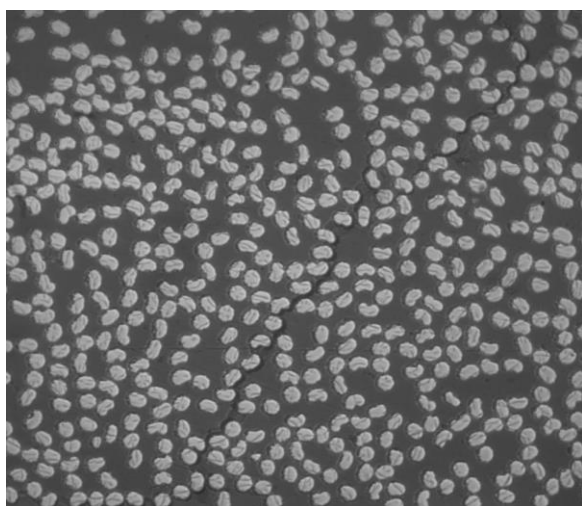


Figura 5.62 Estado de la grieta a 50000 N (izquierda) y 55000 N (derecha) en la probeta 30 h.

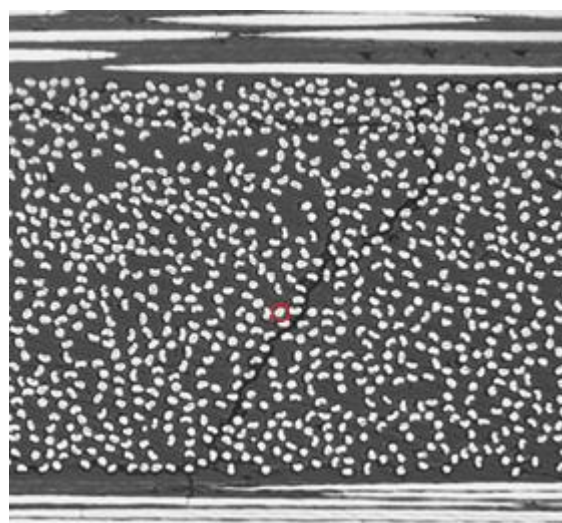
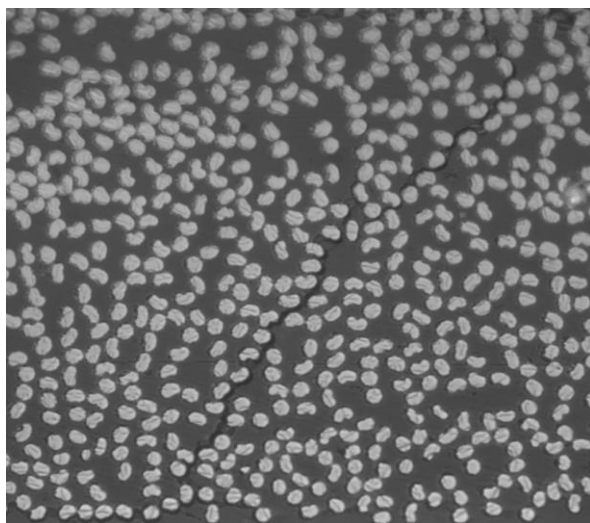


Figura 5.63 Estado de la grieta a 60000 N en la probeta 30 h a distintos aumentos (x500 izq. y x100 der).

Se observa cómo el primer fallo encontrado finalmente se convirtió en una gran grieta que abarcaba transversalmente toda la capa de 90. Además, se puede apreciar un daño asociado a una futura delaminación, pues la grieta se propaga longitudinalmente por la interfase entre las capas de 0 y 90 grados.

5.2.5 Probeta 30 i

En último caso, pasamos a analizar la probeta 30 i. En la Tabla 5.14 se enumeran el número de descargas realizadas, las fuerzas y cargas a las que se han realizado dichas descargas y las deformaciones asociadas.

Tabla 5.14 Datos obtenidos de los ensayos de la probeta 30 i.

Ensayo	Fuerza máx (N)	Tensión máx (Mpa)	Deformación (%)
1	7860,75	151,300	0,18800
2	14803,29	284,926	0,28600
3	17275,41	332,508	0,35160
4	19786,77	380,846	0,40800
5	22200,03	427,295	0,42820
6	24731,01	476,010	0,48860
7	27173,7	523,025	0,55160
8	29606,58	569,852	0,60680
9	32098,32	617,812	0,67637
10	34521,39	664,450	0,72743
11	39406,77	758,481	0,83037
12	44360,82	853,834	0,93476
13	49295,25	948,810	1,03874
14	54200,25	1043,218	1,14209
15	55524,6	1068,709	1,17000

En la Figura 5.64 se muestra la evolución del primer daño encontrado sobre la gráfica que representa la relación

entre la carga y la deformación del extensómetro.

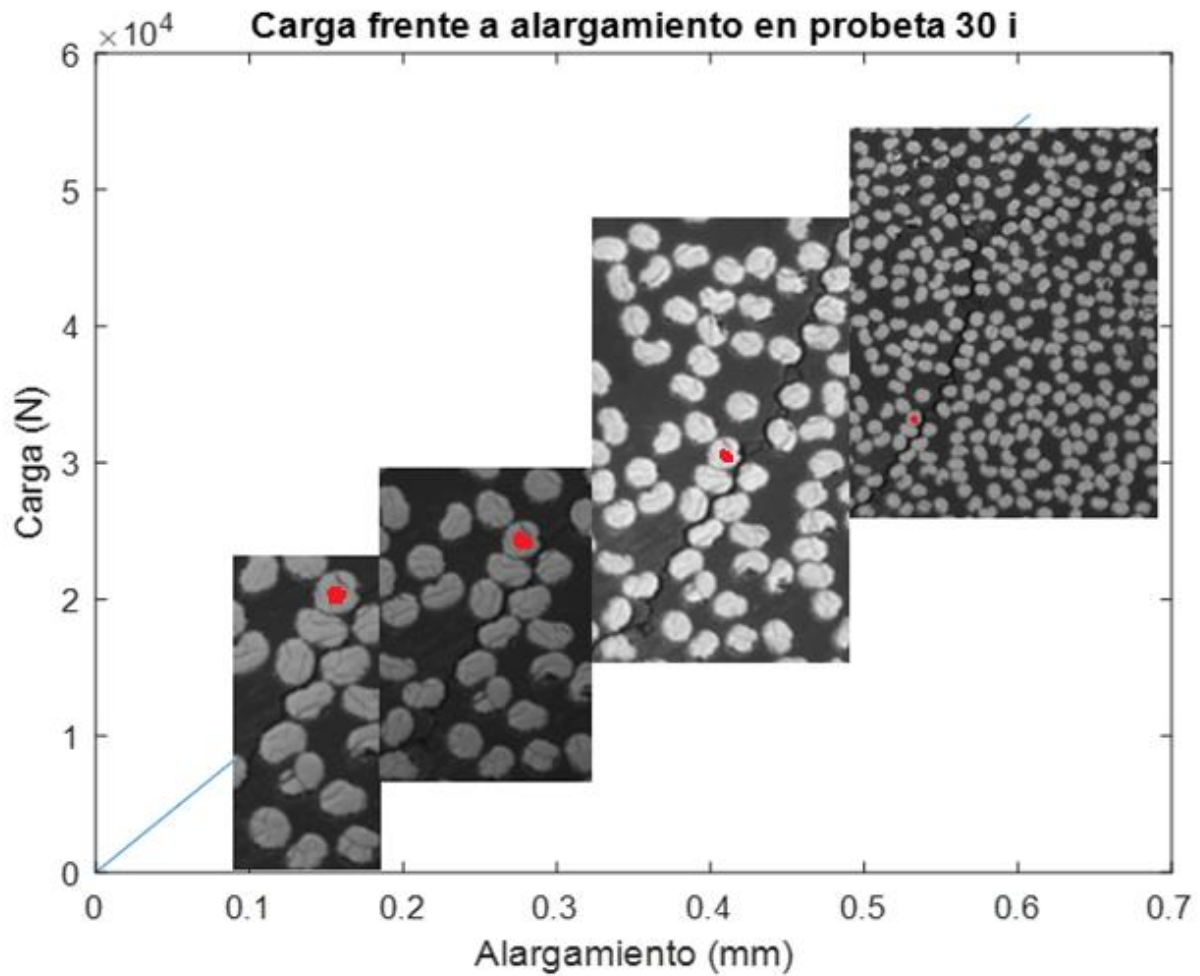


Figura 5.64 Gráfico Carga - Alargamiento junto con la evolución de la primera grieta en la probeta 30 i.

Por último, desde la Figura 5.64 a la 5.68, se muestran las micrografías tomadas en cada descarga para analizar la forma en la que creció la grieta.

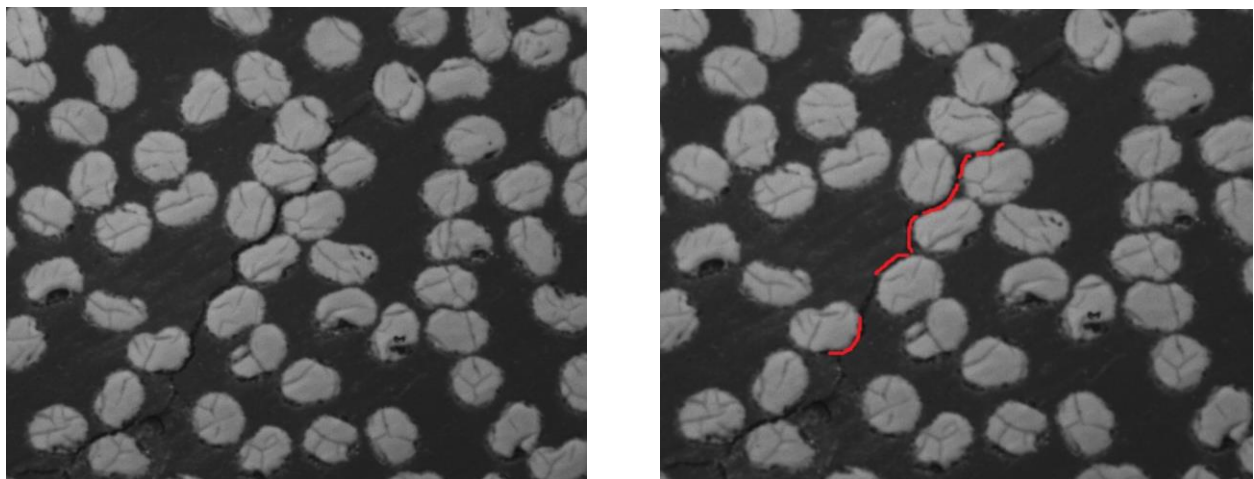


Figura 5.64 Primer fallo a 15000 N (izquierda) con los despegues en rojo (derecha) en la probeta 30 i.

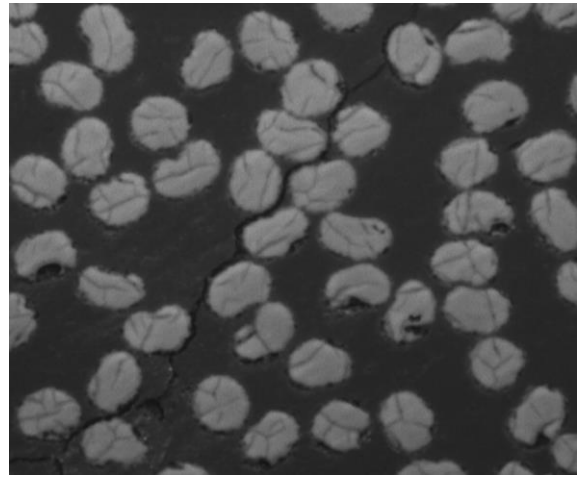
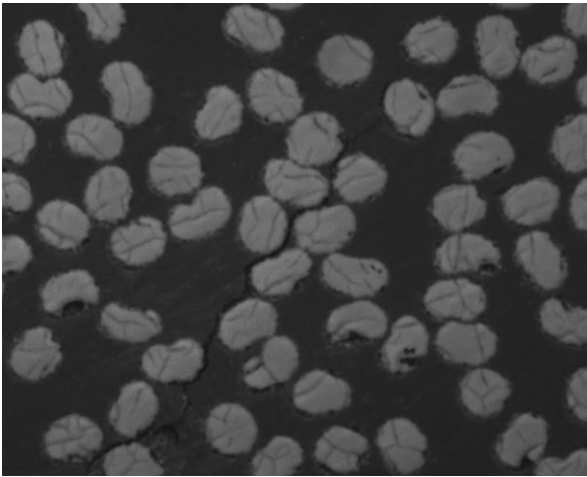


Figura 5.65 Estado de la grieta a 20000 N (izquierda) y 25000 N (derecha) en la probeta 30 i.

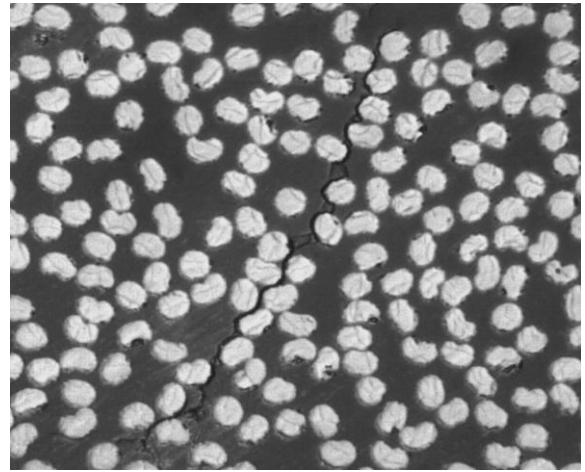
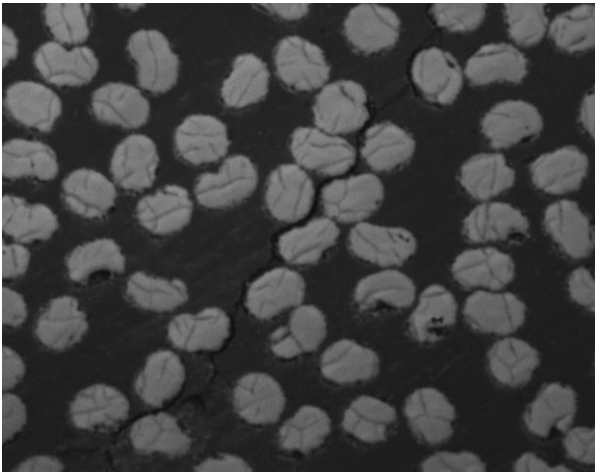


Figura 5.66 Estado de la grieta a 30000 N (izquierda) y 35000 N (derecha) en la probeta 30 i.

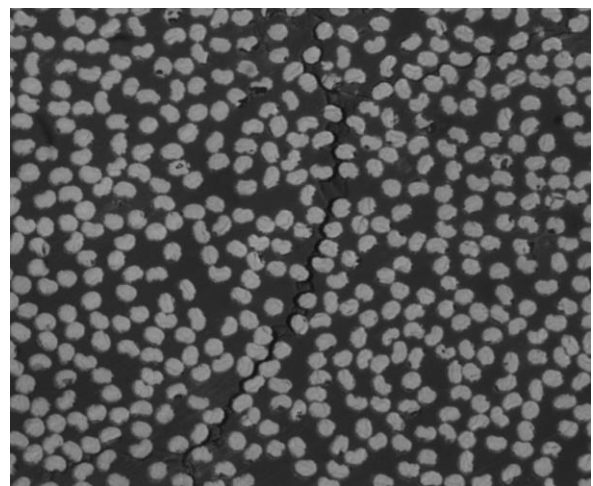
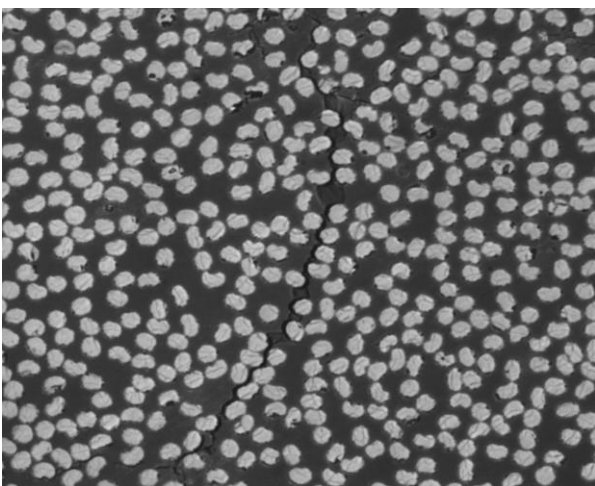


Figura 5.67 Estado de la grieta a 40000 N (izquierda) y 45000 N (derecha) en la probeta 30 i.

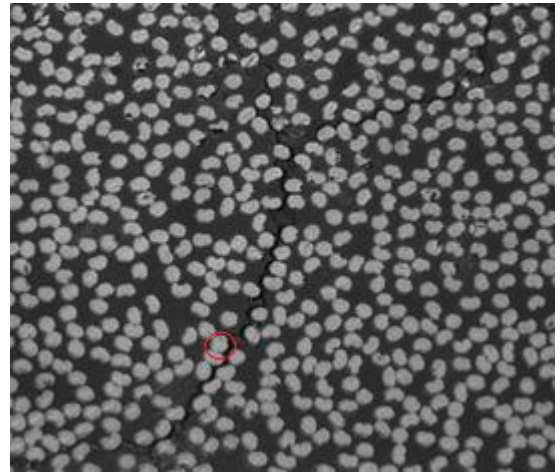
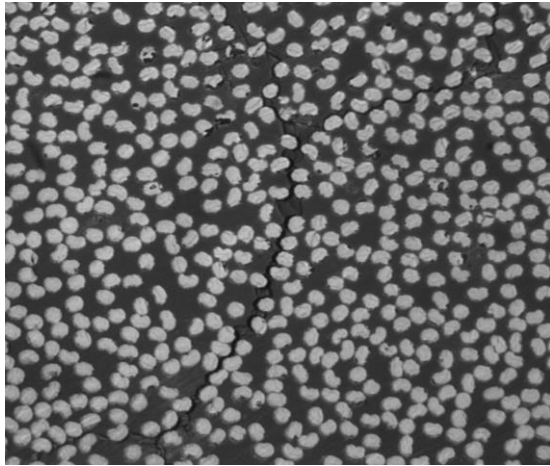


Figura 5.68 Estado de la grieta a 50000 N (izquierda) y 55000 N (derecha) en la probeta 30 i.

Se observa cómo el primer daño encontrado progresó hasta finalmente llegar a convertirse en una grieta de gran tamaño que abarcaba transversalmente toda la capa de 90 grados. En este caso, no se produjo delaminación. Además, en esta probeta también crecieron algunas de las grietas que aparecieron en el laminado, antes de ensayar. A continuación, en las Figuras 5.69 y 5.70, se muestran el estado inicial y final de dichas grietas a las que también se les hizo un seguimiento.

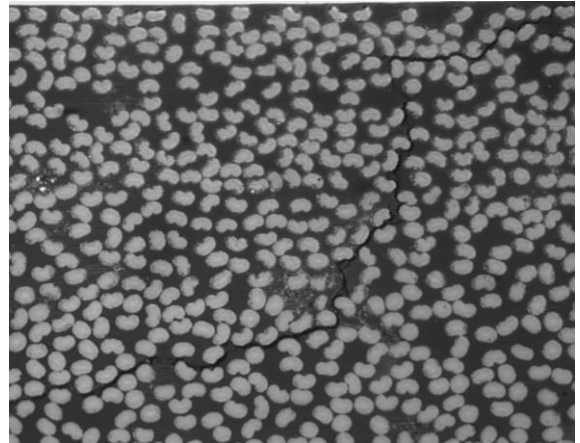
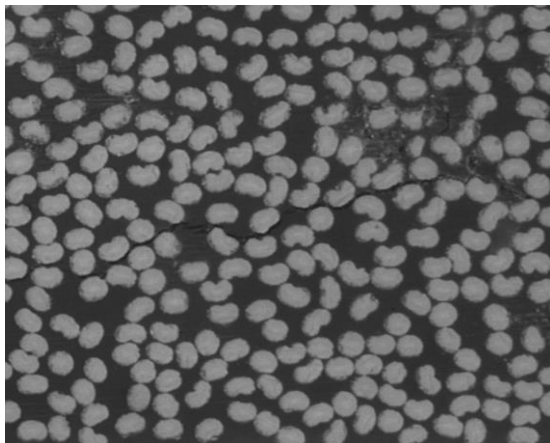


Figura 5.69 Estado de grieta horizontal sin cargar (izquierda) y tras 55000 N (derecha) en la probeta 30 i.

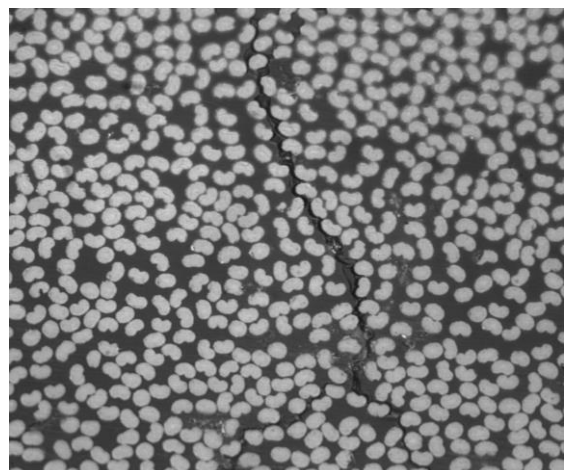
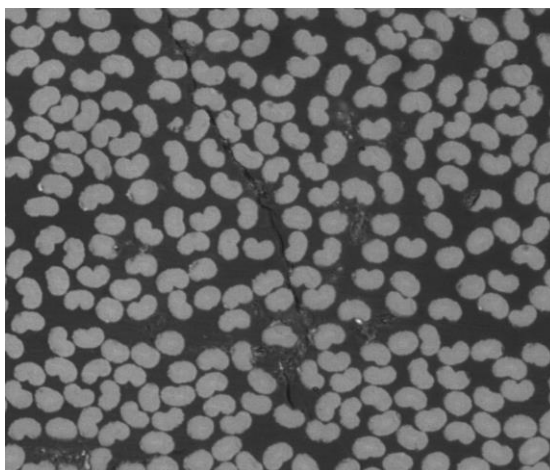


Figura 5.70 Estado de grieta vertical sin cargar (izquierda) y tras 55000 N (derecha) en la probeta 30 i.

6 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En este apartado se va a hacer un análisis de los datos obtenidos de los ensayos realizados para tener una visión conjunta de los resultados. Se emplearán los resultados de los ensayos y las micrografías tomadas en cada caso.

A continuación, se procede a realizar el análisis de los resultados con la finalidad de determinar propiedades y peculiaridades que puedan ayudar a averiguar rasgos distintivos del primer daño de cada panel. En primer lugar, se analizarán los ensayos de caracterización, a continuación, los de aparición y progresión del daño y por último, un análisis general de ambos laminados.

6.1 Análisis de los ensayos de caracterización

Se va a comenzar analizando los ensayos de caracterización de los laminados. Como ya se explicó anteriormente, estas probetas fueron ensayadas hasta rotura obteniéndose una carga a rotura para cada una de las probetas. Además, también se obtuvo el Módulo de Young para algunas de ellas, aunque no todas, pues hubo algunas a las que no se les puso el extensómetro.

En las Tablas 6.1 y 6.2 se muestran los resultados obtenidos de los ensayos, junto con los valores medios, la desviación típica y el coeficiente de variación para las probetas de cada panel.

Tabla 6.1 Cálculos de los ensayos a rotura en probetas de 20 gsm.

Panel de 20 gsm	F_R (N)	σ_R (MPa)
20 e	62411.22	1306.153
20 f	60772.95	1269.505
20 g	53229.06	1113.987
20 h	55338.21	1159.232
Valor Medio	57937.86	1212.219
Desviación Típica	2516.162	52.241
Coef. De Variación	4.343	4.340

Tabla 6.2 Cálculos de los ensayos a rotura en probetas de 30 gsm.

Panel de 30 gsm	F_R (N)	σ_R (MPa)	Módulo de Young
-----------------	-----------	------------------	-----------------

(GPa)			
30 a	45253.53	862.703	-
30 c	61528.32	1219.291	100,086
30 d	58742.28	1151.168	100,420
30 e	64088.73	1254.051	-
Valor Medio	57403.215	1121.803	100,253
Desviación Típica	4843.329	102.734	0,236
Coef. De Variación	8.437	9.158	0,235

Se observa que en la Tabla 6.1 no se han realizado los cálculos correspondientes al Módulo de Young por tener las medidas de tan sólo una probeta. Por ello, es importante recordar que el valor del Módulo de Young obtenido en dicha probeta fue 88,622 GPa.

Analizando los resultados obtenidos en los dos paneles, se obtiene que la media tanto de la carga como de la fuerza a la que rompen las probetas de ambos paneles es muy parecida, ya que ambos laminados tienen similares espesores de las capas de 0 y 90 grados, aunque las que asimilan verdaderamente la carga son las capas a 0 grados. Sin embargo, el coeficiente de variación y la desviación típica son mayores en las probetas del panel de 30 gsm. Por otro lado, los resultados obtenidos de la probeta 30 a distan mucho de los del resto de probetas del mismo panel, lo que suponemos se debe a la heterogeneidad de la distribución de la fibra, o a imperfección en el laminado.

Respecto al Módulo de Young, llama la atención lo pequeños que son los valores de la desviación típica y el coeficiente de variación en las probetas de 30 gsm, pues los resultados fueron muy parecidos en las dos probetas que se estudiaron. Sin embargo, al compararlo con la medida tomada de la probeta de 20 gsm, sí que se aprecia una mayor diferencia. Esto puede ser debido a que el material de 30 gsm tiene un volumen de fibras alrededor de un 10 % superior al del material de 20gsm y a que el espesor las capas de 0 grados también es ligeramente mayor en el laminado de 30 gsm que en el de 20 gsm, ortorgándole ésto una mayor resistencia y rigidez.

A modo de resumen, de estos resultados se concluye que la carga a la cual rompen las probetas de ambos paneles es parecida, aunque la de las probetas de 30 gsm sería mayor si no se tuviese en cuenta la probeta 30 a. Sin embargo, no se pueden sacar conclusiones muy claras acerca del Módulo de Young debido a que sólo se tomaron medidas en 3 probetas.

Es importante destacar la forma de la rotura de estas probetas, pues todas ellas sufrieron una rotura uniforme atravesando el ancho de la probeta transversalmente, en ellas no se produjo la rotura explosiva típica de las fibras a 0 grados. También hay que destacar el hecho de que la rotura en la mayoría de las probetas se producía en los tacos. En la Figura 6.1 se puede observar la rotura de las probetas.

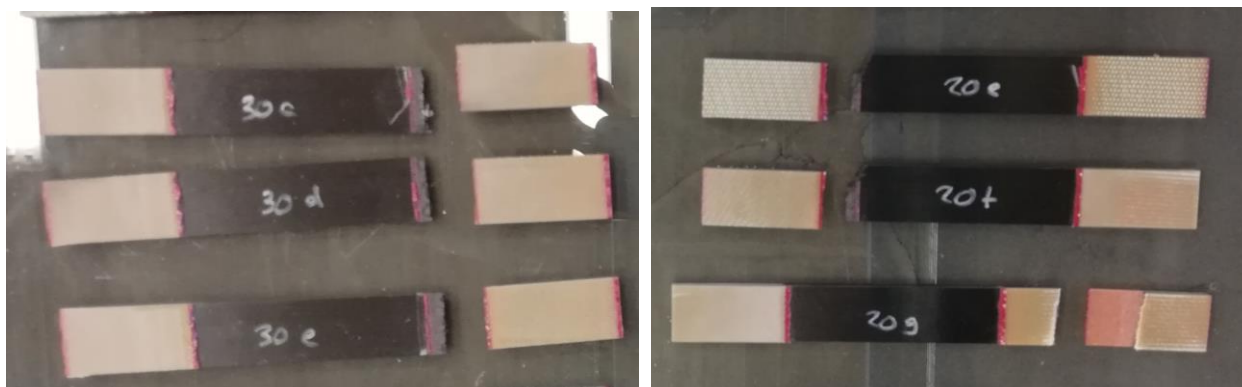


Figura 6.1 Rotura de las probetas de ambos paneles tras los ensayos de caracterización.

6.2 Análisis de la aparición y progresión del daño

En este apartado se van a analizar los resultados obtenidos durante la búsqueda de la aparición y progresión del daño en las probetas empleadas. En primer lugar, es interesante analizar de nuevo las fuerzas y cargas a rotura y el Módulo de Young en cada probeta, para poder compararlos con los obtenidos en los ensayos de caracterización. Hay que tener en cuenta que el hecho de haber ido cargando y descargando numerosas veces estas probetas puede hacer que su carga a rotura se vea afectada.

En las Tablas 6.3 y 6.4 se muestran de nuevo los resultados obtenidos en estos ensayos.

Tabla 6.3 Carga a rotura y Módulo de Young de las probetas del material de 20 gsm.

Panel de 20 gsm	F_R (N)	σ_R (MPa)	Módulo de Young (GPa)
20 a	51414,21	1098,504	87,513
20 b	53719,56	1156,040	75,646
20 c	46234,53	1004,713	70,780
20 d	58506,84	1249,019	89,242
20 j	53072,1	1129,441	87,887
Valor Medio	52589,448	1127,543	82,214
Desviación Típica	2212,06636	44,372	4,210
Coef. De Variación	4,206293172	3,935	5,120

Tabla 6.4 Carga a rotura y Módulo de Young de las probetas del material de 30 gsm.

Panel de 30 gsm	F_R (N)	σ_R (MPa)	Módulo de Young (GPa)
30 b	59075,82	1127,538	91,621
30 f	65256,12	1239,298	95,182
30 g	66188,07	1289,085	96,353
30 h	61489,08	1208,225	95,100
30 i	55524,6	1068,709	91,343
Valor Medio	61506,738	1186,571	93,920
Desviación Típica	2203,241701	44,112	1,141

Coef. De Variación	3,58211437	3,718	1,215
---------------------------	------------	-------	-------

En primer lugar, comparando estos resultados con los obtenidos de los ensayos a caracterización, se observa que los valores medios de la fuerza y carga a rotura en las probetas de 20 gsm disminuyen, mientras que los de las probetas de 30 gsm aumentan. Como ya se ha dicho anteriormente, es posible que el hecho de haber cargado y descargado repetidamente estas probetas haya afectado ligeramente a la carga de rotura, lo que explicaría la rotura más temprana en las probetas de 20 gsm. Sin embargo, el aumento en los valores medios de la fuerza y carga a rotura en las probetas de 30 gsm se debe únicamente a que el valor medio de dichas cargas calculado en los ensayos de caracterización no era representativo, pues los resultados obtenidos de la probeta 30 a distan mucho del resto. En lo que al Módulo de Young respecta, también se observa una tendencia a la baja con respecto a los valores de los ensayos de caracterización.

Relacionando ahora los valores medios de cada panel entre sí, se saca como conclusión que tanto los valores medios de la fuerza y carga a rotura de las probetas de 20 gsm, como los de su Módulo de Young, son menores que los de las probetas de 30 gsm, de nuevo debido seguramente a esa diferencia de volumen existente entre las fibras y de espesor entre los laminados de 20 y 30 gsm. También habría que destacar que el coeficiente de variación respecto a la media del Módulo de Young es considerablemente mayor en las probetas de 20 gsm en relación con el de las probetas de 30 gsm.

Una vez analizados los datos, se pasa al análisis del tipo de daño encontrado. Para tener presente la forma en que se detectaron los primeros daños, en la Figura 6.2 se muestran las primeras micrografías tomadas de cada daño en algunas de las probetas estudiadas.

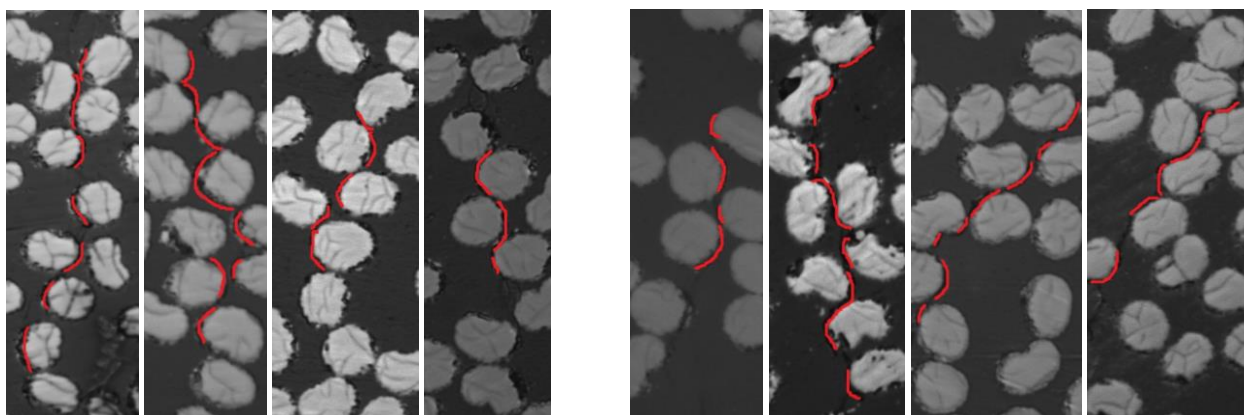


Figura 6.2 Primeros daños detectados en probetas de 20 gsm (izquierda) y de 30 gsm (derecha).

Como se puede apreciar en la Figura 6.2, los primeros despegues se produjeron tanto en fibras circulares como en fibras de sección con forma de riñón y en el caso de esta última, aparecieron tanto por la cara cóncava como por la convexa, aunque en la mayoría de los casos el despegue se produjo en la zona cóncava, entendiendo por cóncava la parte externa y con mayor longitud de arco de dicha sección con forma de riñón y por convexa la parte interior con menor longitud de arco. El único patrón encontrado entre casi todas las probetas es que el primer fallo apareció aproximadamente en la zona media de la capa de 90°, no en los extremos.

Además, en las probetas del material de 20 gsm, el primer fallo se detectó a una carga media de 21750 N, sin tener en cuenta la probeta 20 j, pues se dedujo que la grieta a la que se le hizo seguimiento no había aparecido debido a la carga. En el caso de las probetas de 30 gsm, todos los fallos se detectaron para una carga de 15000 N, a excepción de la probeta 30 f, en la que no se detectó ningún fallo hasta los 40000 N. Aún así, el nivel de carga al que aparece el primer daño no es muy significativo debido al carácter heterogeneo del material.

Una vez estudiados los primeros fallos, estudiamos ahora el estado final de la progresión del primer daño encontrado antes de que se produjera la rotura de la probeta. En las Figuras 6.3 y 6.4 aparecen imágenes de algunas de las grietas finales que aparecen en las probetas de 20 gsm y 30 gsm respectivamente. En estas imágenes se observa de nuevo la tendencia de la grieta a propagarse por las caras cóncavas de las fibras de

sección con forma de riñón. La única diferencia significativa a destacar entre las grietas finales de las probetas de 20 gsm y 30 gsm es que en dos de las probetas de 30 gsm se observa un cierto desvío de la grieta, pues ésta no crece perpendicularmente a la carga. También es importante destacar la aparición de delaminación en casi todas las grietas.

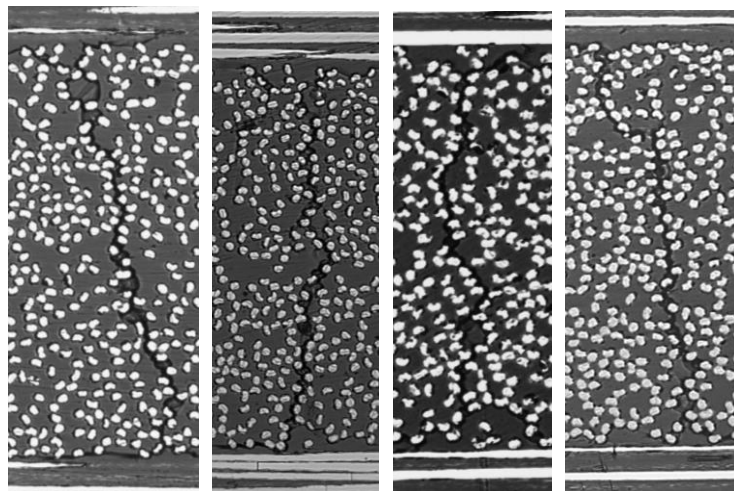


Figura 6.3 Grietas finales en probetas de 20 gsm.

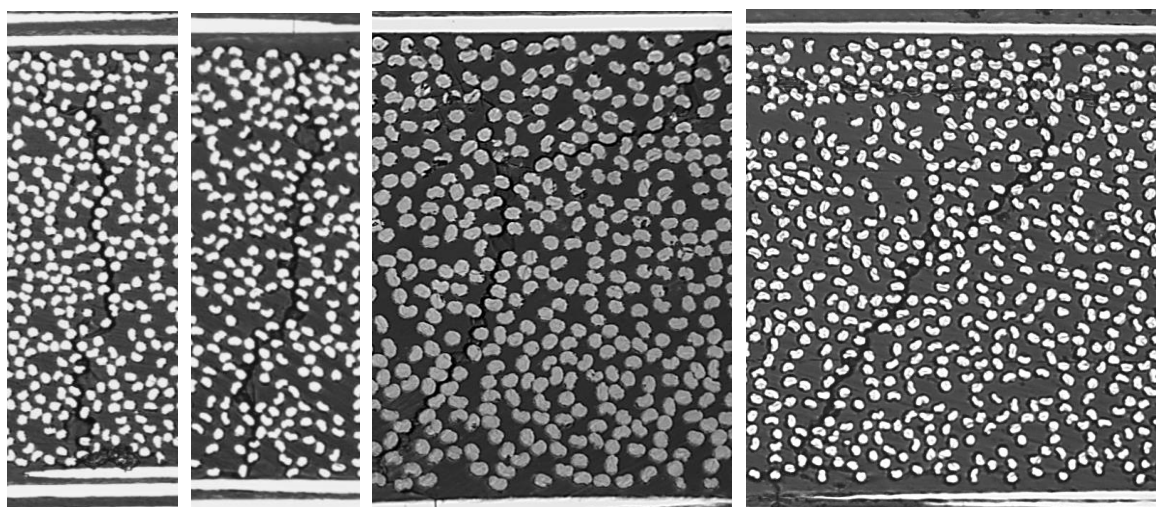


Figura 6.4 Grietas finales en probetas de 30 gsm.

A modo de resumen, en las Figuras 6.5 y 6.6 se recoge la información obtenida acerca de la aparición y progresión del daño en todas las probetas, definiendo 4 estados de daño: primer daño detectado sin uniones entre despegues; daño transversal con uniones entre despegues pero no completo; daño transversal atravesando la capa de 90 grados; y rotura de la probeta. Estas gráficas se han representado con la intención de ver cómo de similar es la evolución del daño en todas las probetas.

Observando las gráficas de las Figuras 6.5 y 6.6 se obtiene que el segundo estado de daño definido se produce para una carga aproximada de 30000 N en las probetas de 20 gsm y de 35000 N en las probetas de 30 gsm y el segundo estado de carga se produce para una carga aproximada de 40000 N en las probetas de 20 gsm y de 45000 N en las probetas de 30 gsm, habiendo ya comentado anteriormente la carga a la que aparece el primer daño y a la que rompen las probetas.

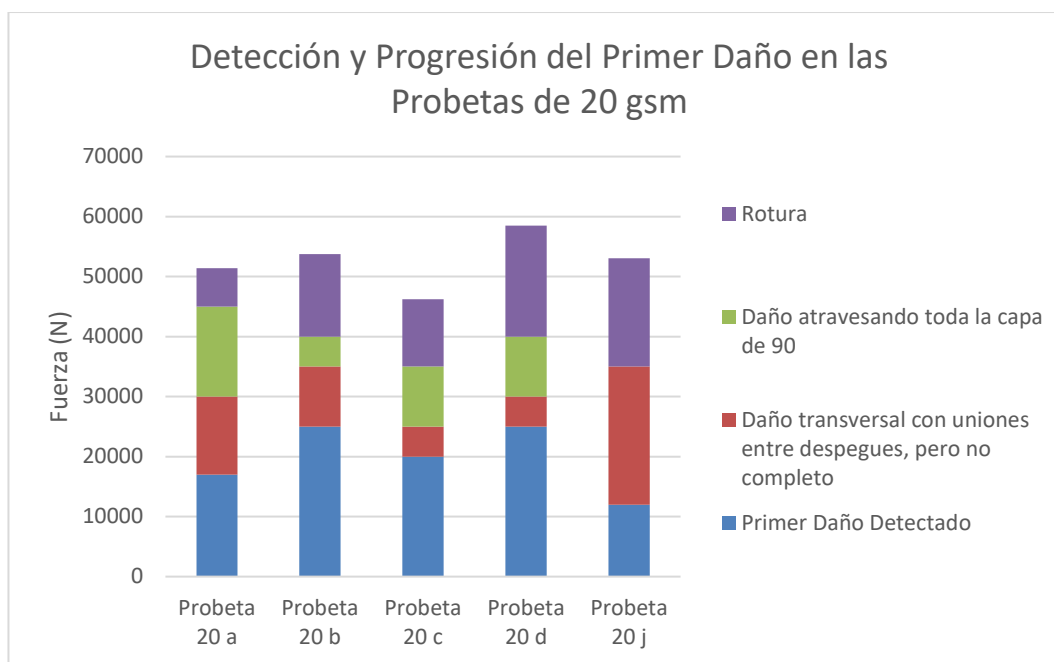


Figura 6.5 Detección y progresión del daño en las probetas de 20 gsm.

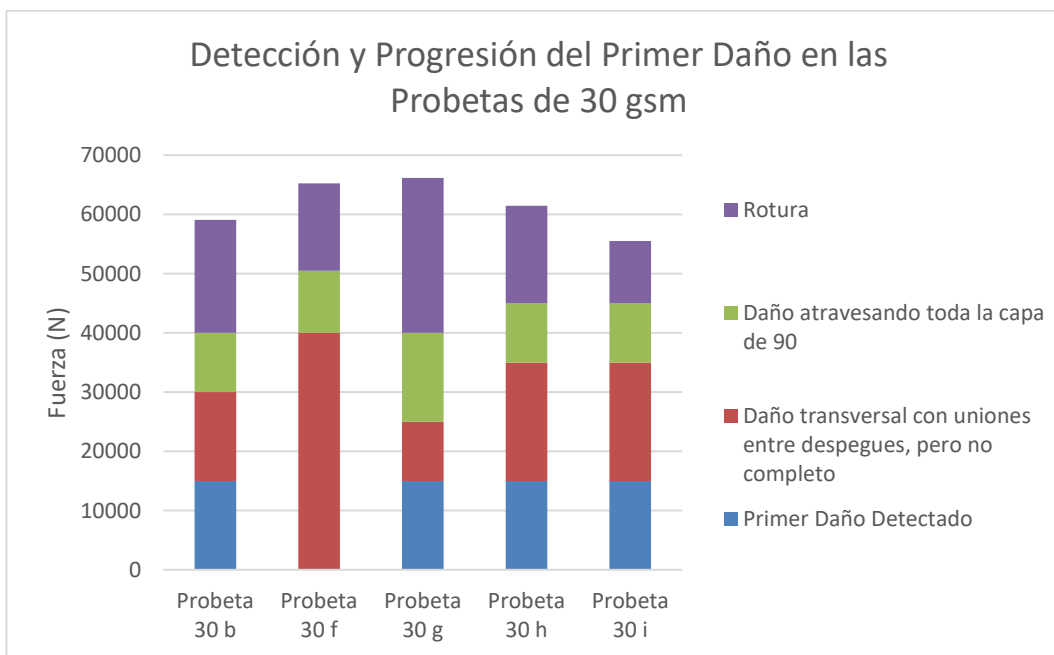


Figura 6.6 Detección y progresión del daño en las probetas de 30 gsm.

Resaltar que habría sido interesante incluir un estado de daño más que recogiera el daño en el que han aparecido indicios de una posible futura delaminación, pero no ha sido posible, pues no disponía de suficientes fotos de todas las probetas con distintos aumentos en cada descarga para observar con claridad las interfases entre la capa de 90 y las de 0 grados.

También es importante destacar que no se detectaron los fallos acústicamente. En ningún momento durante los ensayos se detectó ningún tipo de sonido que anunciara ni los despegues ni la rotura de fibras más que el estruendo final de la rotura completa de la probeta completa.

6.3 Análisis general de los laminados

En este apartado se va a realizar un análisis general de las anomalías detectadas a lo largo del estudio realizado. Se va a comenzar comentando la particular sección en forma de riñón que tienen las fibras de ambos materiales utilizados. En la Figura 6.7 se vuelven a mostrar micrografías de la capa de 90 grados de los laminados para apreciar la forma de las fibras de la que estamos hablando.

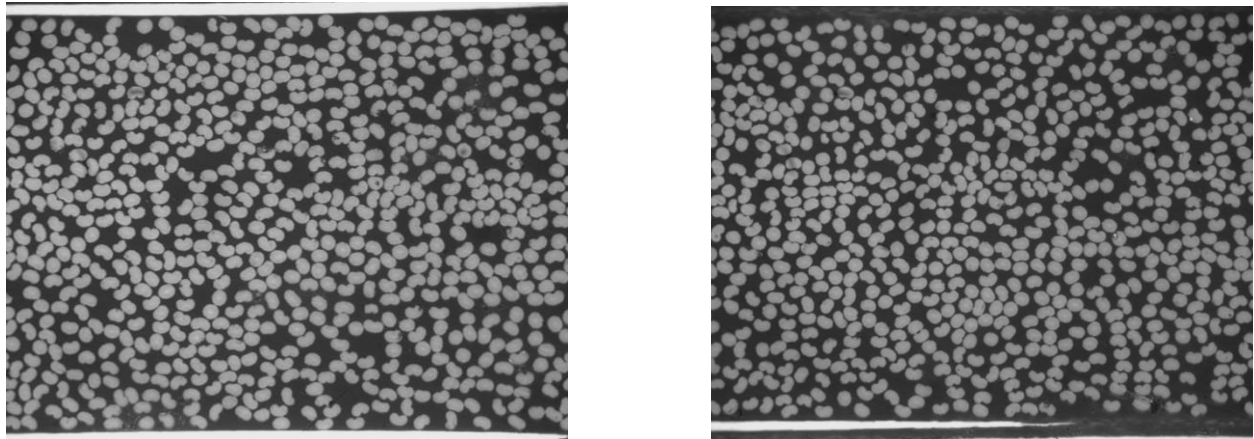


Figura 6.7 Observaciones al microscopio de las fibras en la capa de 90.

Tras pasar un tiempo observando la forma de las fibras, se obtiene que la orientación de las fibras con forma de riñón y su posición a lo largo y ancho de la capa de 90 grados en la probeta parece bastante aleatoria. Tampoco se encontró diferencia alguna en este aspecto entre las fibras del material de 20 gsm y las del de 30 gsm.

También es interesante comentar la aparición de grandes grietas tanto longitudinales como transversales en la capa de 90° en las probetas de ambos laminados antes de ser cargadas. En las Figuras 6.8 y 6.9 se muestran ejemplos de este tipo de grietas detectadas en las probetas.

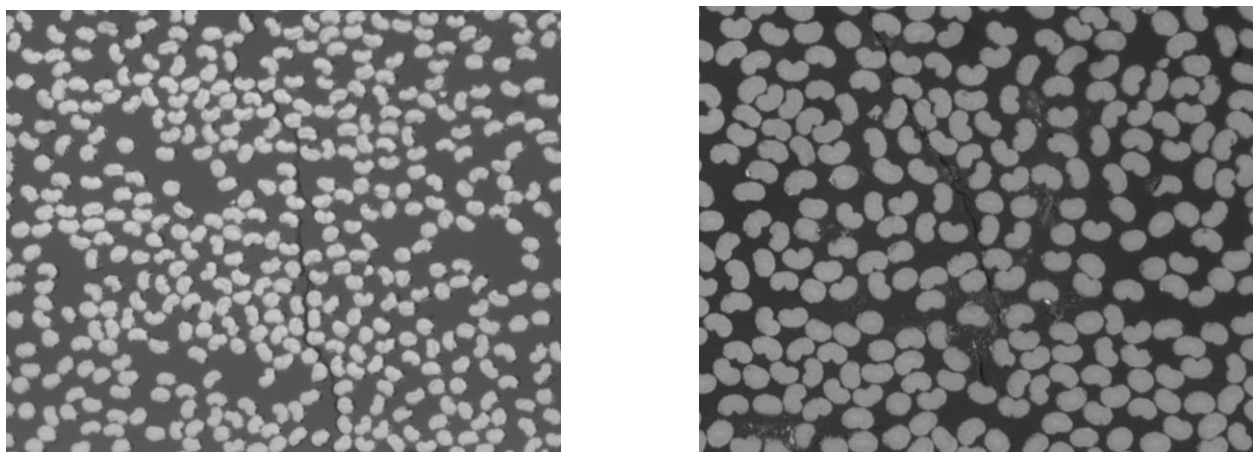


Figura 6.8 Grietas transversales en probetas de 20 gsm (izquierda) y de 30 gsm (derecha).

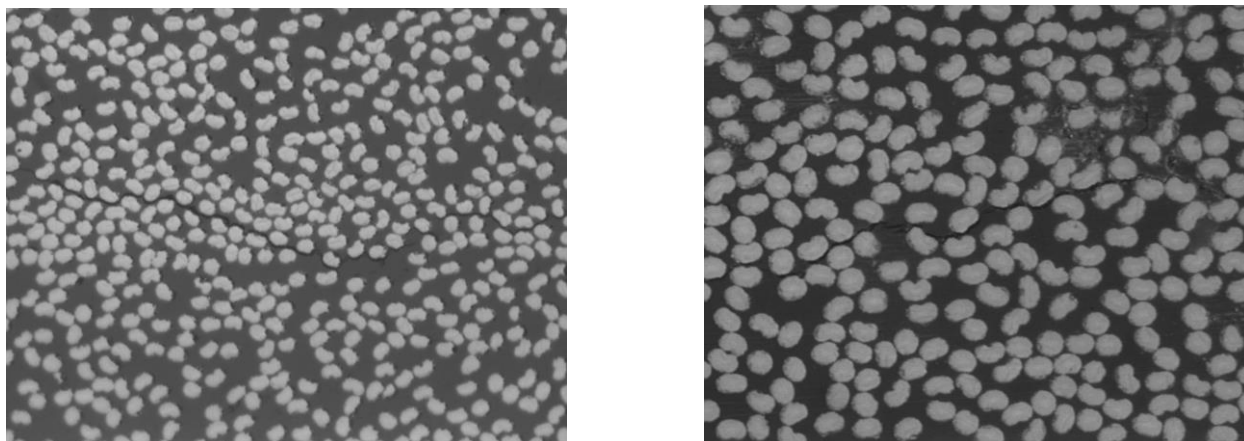


Figura 6.9 Grietas longitudinales en probetas de 20 gsm (izquierda) y de 30 gsm (derecha).

Tras estudiar las imágenes tomadas de este tipo de grietas, no se ha encontrado ninguna relación entre ellas ni se ha detectado separaciones significativas entre las láminas colocadas en las capas de 90° que pudiera dar lugar a apariciones de grietas en dichas zonas de separación. Uno de los motivos posibles que pueden dar lugar a la aparición de este tipo de daño son las tensiones que se producen durante el proceso de curado.

Una vez terminados todos los ensayos, se colocaron todas las probetas sobre la mesa para estudiar la forma en la que habían roto. No se observó diferencia alguna en la forma de romperse entre las probetas de los ensayos de caracterización y las de los ensayos de búsqueda del fallo. Tampoco se encontraron diferencias entre las probetas de los diferentes laminados, por lo que se concluye que todas las probetas tuvieron una rotura uniforme y totalmente perpendicular a la carga y ésta se produjo en una zona cercana a los tacos. En la Figura 6.10 se muestra una imagen tomada con todas las probetas rotas tras terminar de ensayarlas, donde se aprecia la forma de romperse ya comentada.



Figura 6.10 Probetas de 20 gsm y 30 gsm rotas tras ser ensayadas.

7 CONCLUSIONES

En este último capítulo se exponen las principales conclusiones extraídas del presente trabajo experimental.

Comenzando con la fabricación, hay que destacar la enorme complejidad a la hora de apilar las láminas de los dos materiales empleados debido a su pequeño espesor.

Respecto a la campaña de ensayos de caracterización, los valores de la carga de rotura de ambos laminados son muy similares, ya que ambos tienen el mismo espesor de las capas a 0 y 90 grados. Aún así, se observa una leve diferencia debido a que el material de 30 gsm tiene un volumen de fibras alrededor de un 10 % superior al del material de 20gsm y a que el espesor las capas de 0 grados también es ligeramente mayor en el laminado de 30 gsm que en el de 20 gsm, otorgándole ésto una mayor resistencia y rigidez.

De las campañas de ensayos de la aparición y progresión del daño se concluye que, en ambos laminados, la aparición del daño se produce de forma similar: siempre se genera principalmente en el centro de la capa de 90 grados y este daño abarca varios despegues de fibras que pueden estar conectados o desconectados. Con respecto a la progresión de dicho daño, se observa que éste avanza a medida que se aumenta la carga creciendo en general perpendicular a la dirección de aplicación de la carga a lo largo del espesor de la capa de 90 grados hasta alcanzar la interfase entre las láminas. En algunos casos, ha sido posible observar la aparición de daños incipientes, como despegues conectados o desconectados en la capa de 90 grados paralelos a las fibras de la capa de 0 grados que indican la presencia de una delaminación o apuntan a la aparición de la misma de forma generalizada.

En cualquier caso, es importante comentar la significativa sección de las fibras que tienen los materiales empleados en la fabricación de estos laminados, se trata de fibras que tienen forma de riñón y en las que la aparición del despegue puede que no se genere de la misma manera que en el caso de fibras con sección circular. De las observaciones experimentales llevadas a cabo en este proyecto, se puede deducir que en muy pocas ocasiones se han detectado despegues en la zona convexa de dichas fibras con forma de riñón.

Por último, es interesante destacar también la presencia de grietas longitudinales en la dirección de la carga en la capa de 90 grados que se han encontrado en las probetas antes de aplicar la carga y que por lo tanto no tienen origen mecánico. Una posible explicación del motivo por el cual se genera este daño inicial es que puede ser resultado de las tensiones térmicas que se generan en el laminado durante el proceso de curado.

En cuanto a los desarrollos futuros, lo más interesante sería realizar un estudio para entender el origen real del daño longitudinal encontrado en las probetas en las capas de 90 grados antes de ser sometidas a ensayos y para el cual ahora mismo no se tiene una explicación certera.

Desde el punto de vista de ampliar el conocimiento de las propiedades del sistema material usado (fibra+matriz+láminas ultradelgadas), se puede proceder a identificar las propiedades de la interfase fibra-matriz en base a los estudios previos realizados en el GERM.

REFERENCIAS

- [1] **Barbero, E. J.** Introduction to Composite Material Design. Segunda edición. Boca Raton: CRC Press/Taylor and Francis, 2011. ISBN: 978-1-4200-7915-9.
- [2] **Cortes Aguilar, Teth Azrael.** ResearchGate, Apr 2015. https://www.researchgate.net/figure/Figura-2-Graficas-sobre-el-uso-de-materiales-compuestos-en-la-aeronautica-moderna_fig1_291354478.
- [3] **Arroyo León, Elena.** Efecto escala en la resistencia a tracción de laminados de material compuesto. Escuela Técnica Superior de Ingeniería. Universidad de Sevilla, 2018.
- [4] **Navarrete Larive, Victoria Gabriela.** Efecto escala en Materiales Compuestos: estudio del fallo a primera lámina en laminados $[0_4/90_n]_s$. Escuela Técnica Superior de Ingeniería. Universidad de Sevilla, 2019.
- [5] **Paris F., Cañas J., J.C., Barroso A.** Introducción al Análisis y Diseño con Materiales Compuestos. Sevilla : Sección de Publicaciones. Grupo de Elasticidad y Resistencia de Materiales. Universidad de Sevilla, 2009.
- [6] **Velasco, M.L., Correa, E., París, F.** Estudio experimental de la aparición del daño en laminados de material compuesto. 4 Enero, 2017, Aemac, Vol. 2.

